

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Studium zbytkových napětí v součástech z polykarbonátu

Study of Residual Stresses in Polycarbonate Components

Student:

Bc. Darina Machovská

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Vladislav Ochodek

Ostrava 2011

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra mechanické technologie

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Darina Machovská**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **2303T002 Strojírenská technologie**  
Téma: **Studium zbytkových napětí v součástech z polykarbonátu**  
**Study of Residual Stresses in Polycarbonate Components**

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte studii vlastností a technologii výroby součásti z polykarbonátu pro automobilový průmysl.
2. Proveďte rozbor experimentálních metod měření zbytkových napětí.
3. Pro vybrané součásti navrhnete a realizujte experimentální program ověření zbytkových napětí.
4. Dosažené výsledky porovnejte s literárními prameny a proveďte diskusi dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

LEGRAND, D., BENDLER, J. T. *Handbook of Polycarbonate Science and Technology (Plastics Engineering)*. Marcel Dekker Inc. 2000.  
ASM. *Handbook vol. 6, Welding, Brazing, Soldering*. ASM 2001.  
TOTTEN, G., INOUE, T., HOWES, M. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. ASM International 2001.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Vladislav Ochodek**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011

  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.  
vedoucí katedry



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

**Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Doubravici dne 23.5.2011



.....

**Prohlašuji, že**

- jsem byla seznámena s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečné ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užití (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užití díla v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užití své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Doubravici dne 23.5.2011



.....

Bc. Darina Machovská

Doubravice 68

789 82 Moravičany



### **Poděkování**

Děkuji Ing. Vl. Ochodkovi z katedry mechanické technologie VŠB-TU Ostrava za poskytnuté rady při zpracování, paní Ing. Xenii Ševčíkové z laboratoří katedry za pomoc při provedení broušení.

Dále bych chtěla poděkovat panu Ing. M. Konečnému a slečně Ing. J. Brodinové, Ph.D. za vstřícnost, odborné rady a umožnění vypracování diplomové práce ve firmě Hella Autotechnik s.r.o. Také chci poděkovat Ing. M. Valentovi z Ústavu aplikované mechaniky v Brně za provedení měření a následnou vstřícnost a konzultaci při zpracování výsledků měření.

**ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

MACHOVSKÁ, D. *Studium zbytkových napětí v součástech z polykarbonátu: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2011, (73), Vedoucí práce: Ochodek, Vl.

Diplomová práce se věnuje měření zbytkového napětí. V úvodu je popsán materiál, který se používá pro výrobu skel. Dále jsou zpracovány jeho jednotlivé vlastnosti, které jsou důležité pro následnou úpravu a použití. Pro tuto práci byly vybrány dva projekty, na kterých se projevují vady. Na těchto vzorcích bylo provedeno následné měření zbytkového napětí, které se v minulosti na tomto materiálu neprovádělo. Několik metod na zjištění napětí je obsaženo v teoretické části práce. Důležitým faktorem je i úprava materiálu, ta je popsána od počátečního lisování až po konečnou úpravu lakování. V závěru je vyhodnoceno provedené měření a návrh řešení.

**ANNOTATION OF THESIS**

MACHOVSKÁ, D. *Study of Residual Stresses in Polycarbonate Components: thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, 2011, (73), Thesis work leader: Ochodek, Vl.

The master's thesis is about measuring residual voltage. The introduction concentrates on the material which is, used for glass production. The author of the thesis then describes the properties of the material which are important for its subsequent modification and use. Two projects which prove defects were chosen for this thesis. These defective samples were then used for measuring residual voltage which has never taken place on this particular material. There are several methods of voltage detection included in the theoretical part of the thesis. What also influences the material is its modification which is described from the initial phase of pressing to its final lacquering procedure. The conclusion is dedicated to evaluation of undertaken measuring and the suggestion of solution.

**Obsah diplomové práce**

Seznam použitého značení .....	8
Úvod .....	9
1. Charakteristika materiálů pro výrobu dílů automobilového průmyslu.....	10
1.1 Faktory působící na degradaci polymerů.....	11
2. Polykarbonát Lexan.....	13
2.1 Elektrické vlastnosti .....	14
2.2 Světelné vlastnosti .....	14
2.3 Optické vlastnosti .....	15
2.4 Mechanické vlastnosti .....	15
2.4.1 Tuhost .....	16
2.5 Tepelné vlastnosti .....	18
2.6 Chemická odolnost .....	19
3. Postup výroby dílů pro automobilový průmysl .....	20
3.1 Obecné vstřikování plastů .....	20
3.2 Vstřikování pro automobilový průmysl.....	21
3.3 Lakování pro automobilový průmysl .....	22
4. Zkoušky na materiálu z polykarbonátu .....	24
4.1 Chování polykarbonátu v chemických látkách.....	24
4.2 Zbytkové napětí vyvolané navrtáním šroubů do PC desky .....	26
4.3 Měření zbytkového napětí v polykarbonátu .....	31
4.4 Hodnocení zbytkového napětí v přednapěťové fázi pomocí digitálního zpracování obrazu fotoelastického povlaku a metodou navrtávání děr .....	33
4.5 Měření zbytkového napětí metodou PRISM .....	38
5. Rozbor vad světlometů a příčiny jejich vzniku .....	42
5.1 Projekt A.....	43
5.2 Projekt B .....	45
5.3 Zkoumání opticky aktivních látek .....	48
6. Návrh metodiky experimentálních ověření zbytkového napětí .....	50
6.1 Odvrtávací metoda.....	50
6.2 Zdokumentování ostré hrany .....	61
Závěr .....	63
Použitá literatura.....	65
Přílohy .....	

**Seznam použitého značení**

Hustota	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>
Index lomu	$n$	-
Youngův modul	$E$	MPa
Teplota tání	$T_m$	°C
Teplota skelného přechodu	$T_g$	°C
Pevnost v tahu	$R_m$	MPa
Teplota vizkozního toku	$T_f$	°C
Tepelná degradace PC	$T_z$	°C
Tažnost	$A$	%
Napětí	$\sigma$	MPa
Propustnost světla	-	%

## Úvod

V dnešním moderním světě plném různých technologií a výrobků je především kladen důraz na kvalitu a rychlost. Postupy, vedoucí ke kýženému výsledku, mají většinou jednoduchou myšlenku, avšak při průběhu výzkumu, návrhu zhotovení a výsledném výrobku se mohou technologové dostat do různých úskalí. Někdy se problém vyřeší velmi rychle, ale někdy je problematika složitější a doba řešení neúměrně dlouhá. Nastávají také situace, kdy se navrhovaný postup výroby neslučuje s možností jakéhokoli provedení. Dnešní moderní technologie umožňuje větší kreativitu, co se týká např. tvarů jednotlivých výrobků, konstruktérům to ale přináší druhotné problémy. Ale aby firma uspěla na trhu, nezbyvá nic jiného, než inovovat a s problémy se vypořádat. Jedním z nepříznivých vlivů je zbytkové napětí. S ním a s problémy kolem něj se setkáváme v automobilovém průmyslu, kdy důsledkem napětí může docházet k deformaci nebo k prasklině v materiálu.

Cílem této diplomové práce je měřením zjistit velikost zbytkového napětí ve světlometech vyrobených z polykarbonátu.

První část obsahuje popis vlastností konkrétního materiálu, který se používá při výrobě, dále je popsán postup samotné výroby, a to od uskladnění materiálu, vylišování až po konečnou úpravu povrchu, lakování.

V následující části jsou popsány metody, které lze použít pro dané měření zbytkového napětí a jejich vyhodnocení.

Důležité také je zmínit, že jsou v práci popsány vady, které vznikají na určitých projektech, ty jsou zdokumentovány a popsány možnosti jejich vzniku.

V předposlední kapitole je navržený a realizovaný experimentální program ověření zbytkových napětí, podle kterého se samotné měření provádělo.

V poslední kapitole je zhodnocení naměřených výsledků a následná diskuze.

Očekávaným přínosem diplomové práce je využití získaných poznatků pro zkvalitnění výroby světlometů z polykarbonátu, tedy návrh konkrétních technologických opatření pro snížení rizika vzniku vad.

## 1. Charakteristika materiálů pro výrobu dílů automobilového průmyslu

Na výrobu dílů pro automobilový průmysl se používá polykarbonát. Patří mezi polymery či termoplasty. Vyznačuje se dobrou tepelnou odolností, odolností proti nárazu a velmi dobrými optickými vlastnostmi. Nejsnadnější zpracování polykarbonátu je vstřikováním anebo lisováním.[2]

Tab. 1.1 Parametry polykarbonátu [2]

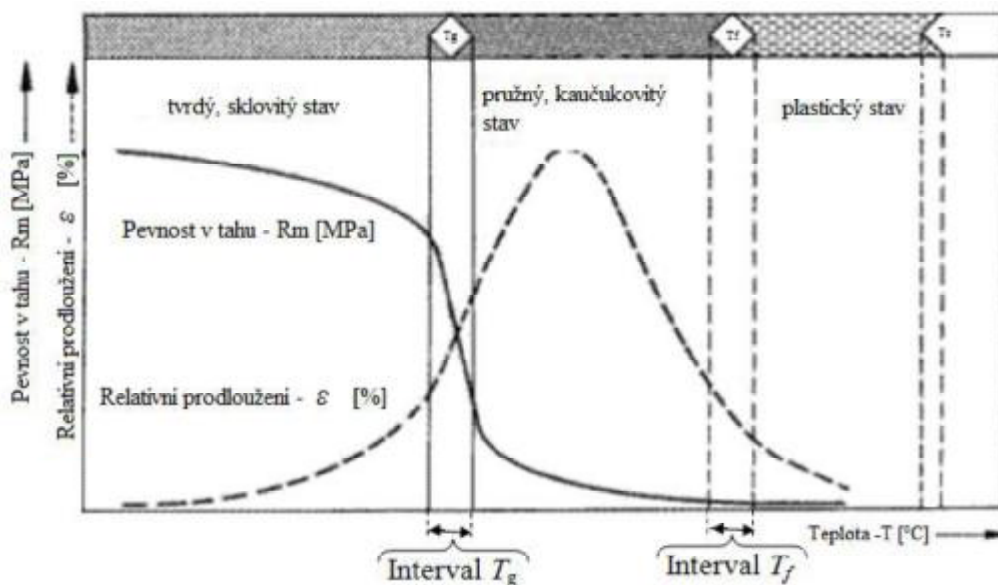
Hustota [ $\rho$ ]	1200 – 1220 kg/m <sup>3</sup>
Index lomu [ $n$ ]	1,584
Youngův modul [ $E$ ]	2 – 2,4 MPa
Tvrdost – Rockwela	M70
Teplota tání [ $T_m$ ]	267°C
Teplota skelného přechodu [ $T_g$ ]	150°C
Pevnost v tahu [ $R_m$ ]	65MPa

### Termoplasty

Termoplasty jsou plastické hmoty tvárné za tepla, zahříváním měknou, ale chemicky jsou stálé. Plastické hmoty se vyznačují svými vlastnostmi, snadným zpracováním a to vstřikováním anebo lisováním do požadovaných polotovarů a všestranným použitím.[3] Pro jejich výrobu se používá ropa a uhlí. Skládají se z makromolekulárních látek, kdy plastickou hmotu tvoří pojiva (makromolekulární látky – pryskyřice) dále plniva a další přísady. Termoplasty se dají lehce modelovat do různých tvarů pouze mezi teplotou skelného přechodu 150°C a teplotou tání 267°C. [4]

### Teplota skelného přechodu

Je to teplota, při níž polymer přejde z vláčného kaučukovitého stavu do stavu křehkého sklovitého. Tato teplota představuje fyzikální změny stavu a účinky teploty, které se projeví změnou pohyblivosti makromolekul.[5] Pod teplotou skelného přechodu je polymer ve stavu sklovitém, je tvrdý, křehký a má vysoký modul pružnosti. Naopak nad touto teplotou se nachází v kaučukovitém stavu, kde i malá napětí způsobují velké deformace.[6]



Obr. 1.1 Diagram amorfních polymer[6]

$T_g$  – teplota skelného přechodu

$T_f$  – teplota viskózního toku – dochází k přeměně na vysoce viskózní kapalinu a ztrátě kaučukovitých vlastností

$T_z$  – tepelná degradace polymeru

Faktory ovlivňující teplotu skelnění jsou chemická struktura, molekulová hmotnost, složení kopolymeru (polymer, u kterého se makromolekuly skládají z merů dvou nebo více druhů) a také tlak a přítomnost plniva.[4]

## 1.1 Faktory působící na degradaci polymerů

- Kyslík
- Voda
- UV záření
- Chemické látky
- Mechanické namáhání

Kyslík a UV záření - působení těchto dvou vlivů současně vyvolává v polymerech větší poškození než při působení samostatně. [5]

Kyslík a vlhkost – při působení kyslíku a vlhkosti dochází k difuzi kyslíku do polymeru.

Kyslík, ozon a mechanické namáhání – při mechanickém namáhání může docházet k narušení chemické vazby mezi atomy polymerního řetězce. [5]

Teplota – působení teploty vyvolává změny chemické struktury, s rostoucí teplotou roste rychlost oxidace, zvýší-li se teploty o 10°C, tak rychlost reakce se zvýší dvakrát. Zvýšená teplota způsobuje přesun stabilizátorů, změkčovadel a dalších přísad z polymeru – koroze polymeru. [5]

Voda – působí jako dešťová voda, mlha, rosa a sníh. Fyzikální účinek vody působí jako změkčovadlo a tím ovlivňuje mechanické vlastnosti. Pokud dojde ke změnám obsahu vlhkosti u citlivých polymerů, tak dochází ke změnám rozměrů, kde vznikají vnitřní pnutí, které mohou vést k trhlinkám dále k praskání materiálu a pórovitosti. Mechanický poškození je způsobeno účinkem vody, prudkým dopadáním dešťových kapek nebo krup.[5]



## 2. Polykarbonát Lexan

Tento termoplast se vyznačuje vysokou mechanickou odolností, dobrými optickými, tepelnými a elektrickými vlastnostmi.[8] Lexan je na základě svých optických vlastností a odolností proti průrazu vyhledávaným materiálem. Nabízí širokou paletu výrobků, které splňují nejvyšší požadavky, jako jsou odolnost proti nárazu, odolnost proti poškrábání, tepelná odolnost a optické kvality.[7]

### Vlastnosti polykarbonátu lexan: [7]

- Odolnost vůči nárazu ve velkém teplotním rozsahu
- Široká pestrost barev
- Vysoká optická jasnost
- Vysoká tepelná odolnost
- Vysoký lesk
- Vynikající průhlednost

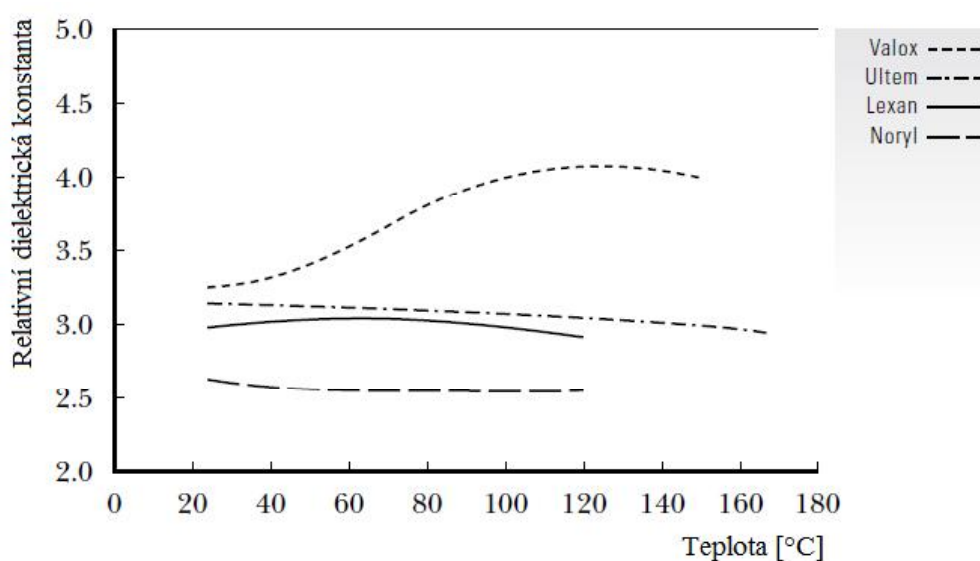
Lexan pryskyřice je přizpůsoben pro tvářecí procesy vstřikování plastů, vytlačování a vyfukování. Je vhodný pro jednoduché typy tenkostěnných aplikací s dlouhými průtoky. Materiál se dá recyklovat a opětovně použít.[7]

Tab. 2.1 Typické vlastnosti Lexan [7]

Modul pružnosti	2350 MPa
Napětí v ohybu	90 MPa
Tažnost	6%
Napětí	65 MPa
Ohybový modul	2300 MPa
Tepelná vodivost	0,2 W/m°C
Hustota	1,2 g/cm <sup>3</sup>
Propustnost světla	88 – 90 %
Index lomu	1586

## 2.1 Elektrické vlastnosti

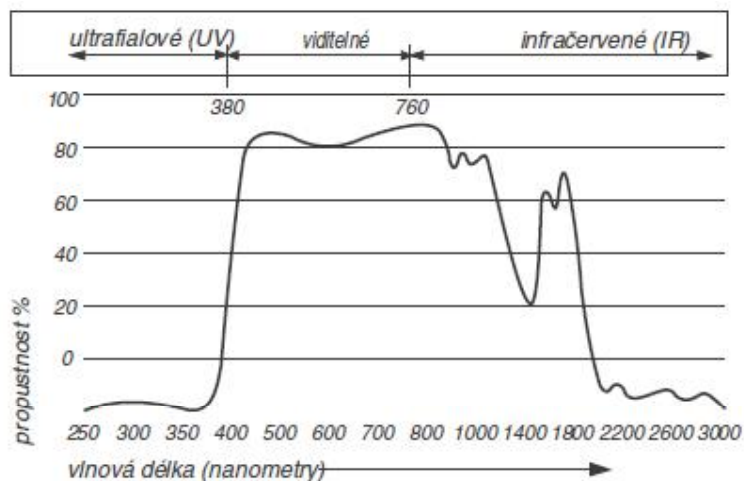
Tento materiál se vyznačuje odolností proti ohni, zpomalujícím hořením. Tyto vlastnosti se dají využít v celé řadě výrobků, jako jsou vypínače, zásuvky, konektory a relé. Vyznačuje se vysokým leskem nebo texturou v mnoha barvách, vysokou rázovou houževnatostí. Lexan je výborným elektrickým izolátorem. Dielektrická konstanta při 60Hz a 50% vlhkosti (Obr. 2.1) ukazuje srovnání Lexanu s jinými polymery. Vyšší hodnoty znamenají lepší izolační vlastnosti. [7]



Obr. 2.1 Dielektrická konstanta [7]

## 2.2 Světelné vlastnosti

V technickém oboru je Lexan rozšířen, protože nabízí snadné, vysoce kvalitní osvětlení. Používá se pro výrobu žárovek, pouličního osvětlení, semaforů a nouzového osvětlení. Vlastnosti jsou, vynikající odolnost proti nárazu při teplotě od 0°C do 125°C, vynikající optické vlastnosti, tepelná odolnost proti deformaci při 133°C, rozměrová stálost, odolnost proti UV záření i při dlouhodobém působení a odolnost proti korozi a povětrnostním vlivům a odolnost proti poškrábání.[7]



Obr. 2.2 Propustnost světla [8]

Tab. 2.2 Propustnost světla[8]

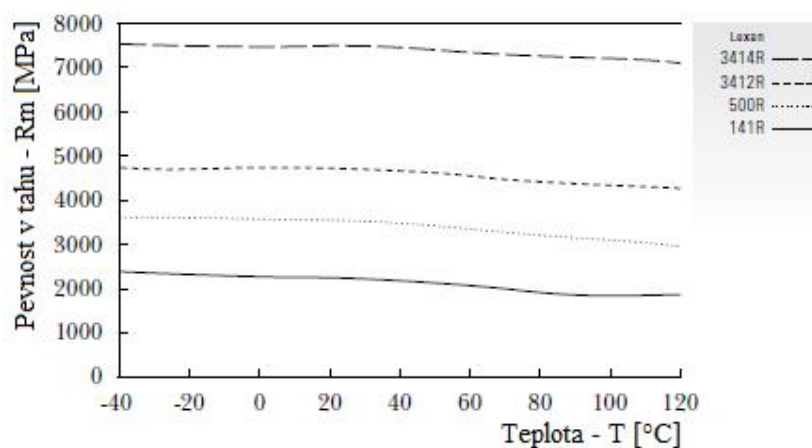
Středovlnné UV záření (UV-B)	280 – 315 nm
Krátkovlnné UV záření (UV-A)	315 – 380 nm
Viditelné světlo	380 – 780 nm
Krátkovlnné infračervené (IR)	780 – 1400 nm
Středovlnné infračervené (IR)	1400 – 3000 nm

## 2.3 Optické vlastnosti

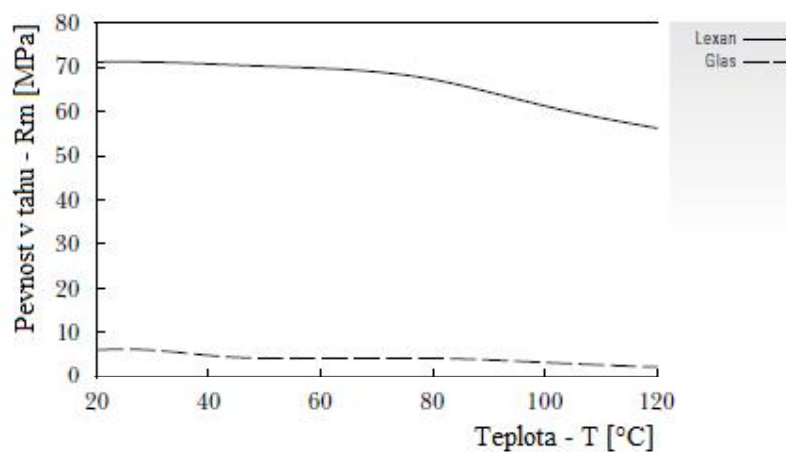
Pro optický průmysl je materiál používán pro své speciální optické vlastnosti. Propustnost světla je větší jak 88%, zabudovaná ochrana proti UV záření, vysoká rázová houževnatost, vysoká tepelná odolnost, rozměrová stálost a nízká absorpce vody, vysoký index lomu 1586, výroba o 20% tenčí čočky než z konvenčních materiálů, nízká hmotnost a neomezená svoboda designu. Dále se používá na kryty světlometů bez aplikace základního nátěru.[7]

## 2.4 Mechanické vlastnosti

Lexan má velice dobrou stabilitu svých mechanických vlastností ve velkém rozsahu teplot. V grafu (obr. 2.3) je zobrazená pevnost v tahu v závislosti na teplotě. Na (obr. 2.4) je srovnání pevnosti v tahu závislé na teplotě pro lexan a sklo.[7]



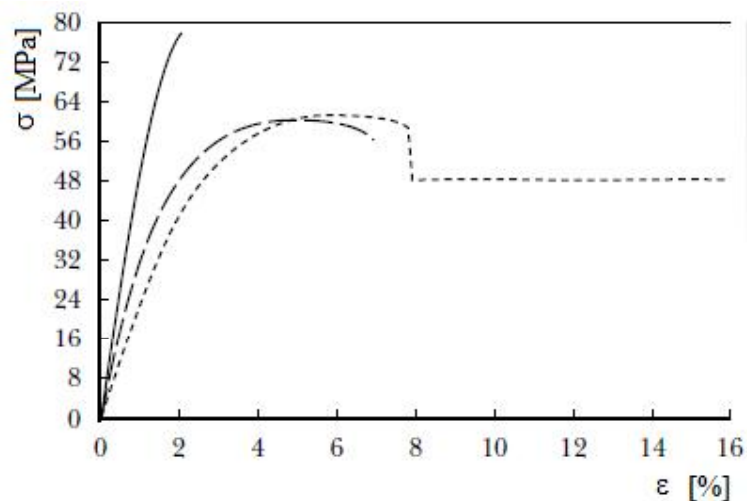
Obr. 2.3 Pevnost v tahu závislá na teplotě [7]



Obr. 2.4 Srovnání pevnosti v tahu závislé na teplotě [7]

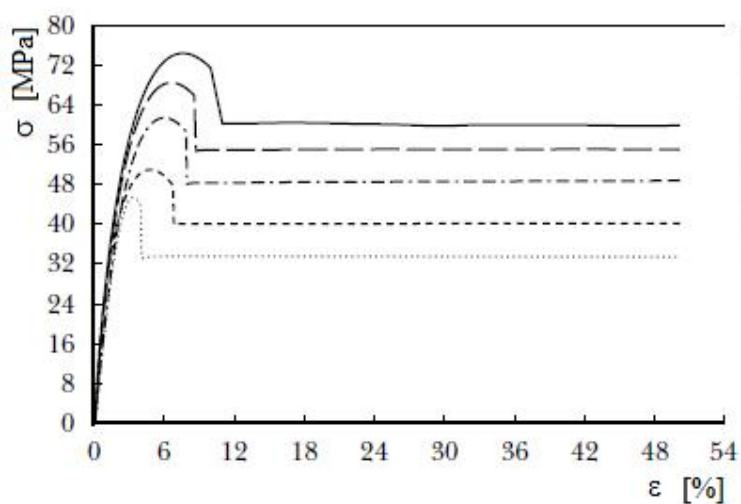
### 2.4.1 Tuhost

Tuhost je definována jako poměr mezi zatížením a částí deformace. Důležitou vlastností je zde napětí a deformace. Porovnání namáhání v tahu (Obr. 2.5) a napětí při přetržení. Hodnoty jsou z materiálu Lexan při 10% zesílení, 500R při 20% zesílení a 3421R skla při vyztužení.[7]

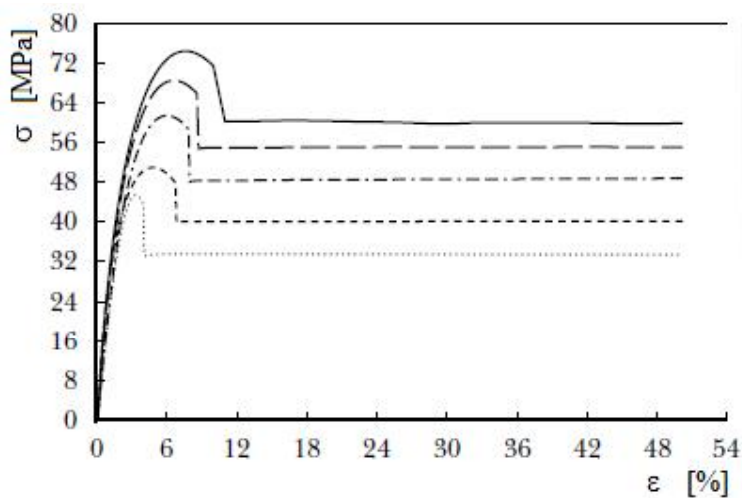


Obr. 2.5 Tahový diagram [7]

Dalším důležitým faktorem při výpočtu namáhání je teplota, při které probíhá napětí. [7]



Obr. 2.6 Křivka napětí Lexan 141R [7]



Obr. 2.7 Křivka napětí Lexan 3412R [7]

## 2.5 Tepelné vlastnosti

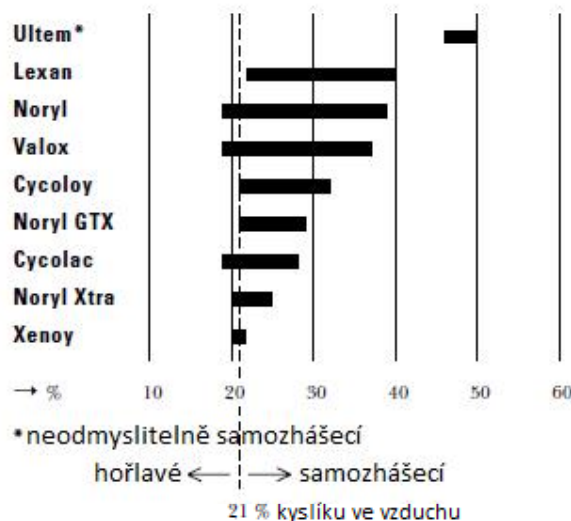
Vysoká odolnost materiálu proti proražení a jeho tuhost zůstává zachovaná i při dlouhodobém působení tepla. Hodnota modulu ohybu se snížila na 85% při působení teploty 80°C. Teplota tání a tvarová stálost při zatížení je kolem 140°C. Lexan polykarbonát lze použít v teplotním intervalu od +100°C do -40°C. [8]

Teplotní index se používá pro stanovení mezních hodnot použitelnosti při dlouhodobém zatížení. Vlastnosti materiálu, které jsou pro něj důležité, testují se při rozdílných teplotách. Výsledek je teplota, při které měřená vlastnost neztrácí víc jak 50% z původní hodnoty v období deseti let. [8]

Tab. 2.3 Teplotní index[8]

Materiál	Hodnota
Lexan polykarbonát	100°C
Akryl	50°C
PVC	50°C

Lexan dobře odolává ohni, protože při vystavení vysoké teplotě materiál taje, ale nehoří. [8]



Obr. 2.8 Srovnání hořlavosti různých materiálů [7]

## 2.6 Chemická odolnost

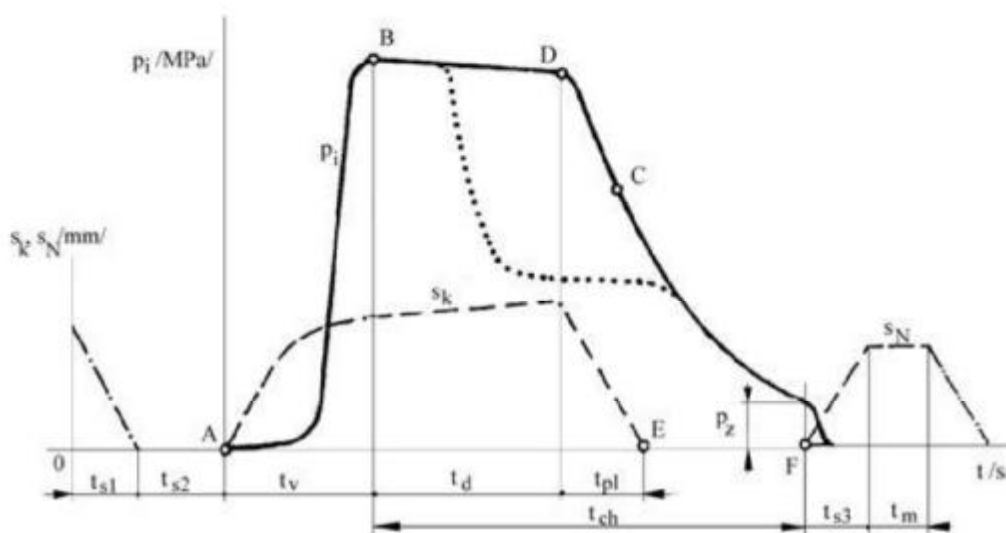
Lexan v kombinacemi s určitým chemickým prostředím může být narušen. Z tohoto důvodu se provádí testy s chemikáliemi, se kterými může přijít do kontaktu. Ve všech případech je testování doporučeno za provozních podmínek. Pokud je Lexan v kontaktu s vodou jsou jeho vlastnosti obvykle zachovány. K praskání může dojít při vysokém zatížení, působením horké vody nebo setrváním ve vlhkém prostředí. V příloze A je zobrazen přehled chemické odolnosti polykarbonátu Lexan, která je závislá na době kontaktu, teplotě a napětí. Chemický kontakt může způsobit změknutí, odbarvení nebo trhliny. Odolnost proti chemikáliím byla testována za předem stanovených podmínek, teplota (20°C a 80°C) a napětí (0,5% a 1%) po dobu sedmi dnů.[7]

Chemické prvky, u kterých je označení (-) tak se nedoporučuje a odolnost je špatná, následkem je vážné poškození vlastností, (0) znamená velmi dobře, ztráty vlastností nejsou tak kritické, (+) označuje dobré, nedochází k žádnému poklesu vlastností.[7]

### 3. Postup výroby dílů pro automobilový průmysl

#### 3.1 Obecné vstřikování plastů

Vstřikování je jedním ze způsobů tváření plastů. Při tomto procesu se materiál v podobě granulí je přiváděn do násypky, ze které se pak odebírá pomocí pracovní části stroje, kde je hmota přiváděna do tavicí komory, ve které se materiál zahřívá. Vzniklá tavenina se následně vstříkne do dutiny formy. Po vstříknutí následuje fáze tlaková pro snížení rozměrových změn. Forma se ochlazuje a výrobek ztuhne. Potom se forma otevře a výrobek se odebere z formy. Vstřikování probíhá několika stupni. Doba chlazení - ta musí být co nejkratší, aby zaplnila celou dutinu. Materiál musí do formy vtékat postupně, teplota formy je 3krát až 4krát nižší než teplota taveniny. Doba dotlaku  $t_d$  - ta je závislá na průřezu vtokového kanálku, tento proces trvá několik sekund. Provádí se proto, aby nedocházelo během chladnutí ke smrštění výrobku a propadlinám. Doba plastikace  $t_{pl}$  - to je čas, za který dojde k zplastikování dávky plastu. Doba chlazení  $t_{ch}$  - závisí na druhu plastu, teplotě taveniny, teplotě formy a na teplotě výstřiku. Chlazení začíná probíhat už při samotném vstřikování až do doby dotlaku. Chladnutí ovlivňuje strukturu krystalizace, kvalitu povrchu, vnitřní pnutí a také lesk výrobku.[9]



Obr. 3.1 Průběh vstřikování [9]



### 3.2 Vstřikování pro automobilový průmysl

Před tím, než dojde ke vstřikování, musí materiál projít sušícím zařízením. Sušení probíhá po nasátí z venkovních sil, které jsou umístěny v blízkosti budovy. Objem jednoho sila je 35 tun. Ze sila jsou materiály přiváděny do hlavní sušící místnosti, kde se nachází sušičky, které se liší objemem. Do sušičky je přiváděn vzduch přes sušící zařízení. V něm se nachází směs granulí, přes které se vzduch vysuší a putuje dál do sušičky, kde postupně prochází přes Lexan a postupně z něj odsává vlhkost, která je pak odváděna pryč. Teplota vzduchu při sušení je 120°C a doba sušení je 3 až 4 hodiny. Po vysušení se materiál přivádí hadicemi přímo k jednotlivým lisům. Pak je dál přiváděn do zásobníku, každý lis má svůj zásobník.

Každé silo má svoji váhu, její displej je umístěn u každého lisu, zobrazuje se na ní, kolik kilogramů je ještě k dispozici a kdy má proběhnout další plnění. Každý lis denně spotřebuje jednu tunu materiálu.

Vysušený materiál přiváděný potrubím jde do násypky, doba setrvání je 15 minut. Z násypky pak jde do vstřikovacího válce a ohřívá se, kdy projde sedmi teplotními pásmy, pod násypkou je teplota trochu nižší asi 270 – 280°C. Vstřikovací teplota je 275 – 305°C, vstříkne se do formy, která je natemperovaná na teplotu 80°C.

Po vylisování je vzorek odebrán robotem z formy a přemístěn k odstranění vtoku, který se odstříhne pneumatickým stříhadlem. Vtoky jsou shromažďované a později znovu namleté a použité opět na zpracování, dávají se 2% namletého materiálu do 100% nového materiálu. Po odstřížení projde vzorek přes ionizátor (ofukovací zařízení) pro vybití statické elektřiny po vyjmutí z lisu, aby nedocházelo k přitahování nečistot na povrch skla. Ionizátor je složen z lišt, ve kterých jsou umístěny trysky, kterými je přiváděn ionizovaný vzduch. Ideální napětí na sklech je  $\pm 20\text{V}$ . V ionizovaném vzduchu jsou protony a elektrony, které sklo také obsahuje, pokud mu nějaké chybí, tak ionizací jsou mu navraceny a tím dochází ke snížení napětí.

Skal se dále uloží na dopravní pás a putují směrem k lakovně. Transportní doba trvá okolo jedné minuty, záleží na vzdálenosti lisu od lakovny, tím pádem se liší teplota jednotlivých dílů. Ideální teplota skla je okolo 40°C, pokud by se teplota pohybovala okolo 50°C je zde možný výskyt pomerančové kůry na povrchu.

Po odebrání robotem z pásu těsně před lakováním projde vzorek ionizačním zařízením ze spodu i z vrchu, pro zbavení nečistot, které se mohly přichytit během transportu od lisu.

### 3.3 Lakování pro automobilový průmysl

Jsou zde dvě lakovny (viz. Příloha C – schéma lakovacího prostoru KAS). Skla se odebírají z pásu a umísťují na lakovací šablony, které jsou připevněny na dopravníku, který posune sklo před lakovací kabinu, tam sklo setrvá a dochází k chladnutí před lakováním, teplota skla je měřena teploměrem (Tab. 3.1). Teploty skel se liší podle toho, v jaké vzdálenosti je umístěn lis, ze kterého je sklo dopravováno.

Tab. 3.1 Teplota skel před lakováním

<b>Projekt A</b>	L	R
	46 °C	46°C
<b>Projekt C</b>	L	R
	30 °C – 35 °C	34°C – 35°C
<b>Projekt D</b>	L	R
	42°C – 43°C	42°C – 43°C

Následně dochází k lakování pomocí lakovacího robota. Lak je zahříván na teplotu 30°C, spotřeba laku je 10 g/jedno sklo. Technické údaje o laku (viz. Příloha D). Vrstva laku na skle se pohybuje v rozmezí 9 – 14 µm. Vrstva IPL vznikla spojením skla a laku, je tlustá 1 – 3,5 µm. Tloušťku této vrstvy lze ovlivnit v sušící zóně, čím větší teplota, tím větší IPL vrstva. Lakování trvá cca 8 sekund a mělo by k němu docházet do 4 hodin po vylisování, kvůli teplotě skla a vrstvy IPL.

Hustota laku je 1036 kg/m<sup>3</sup>, lak je citlivý na modré světlo, proto se zde zavedlo oranžové osvětlení pomocí ochranných fólií na dveřích. Lak je v balení o 180 kg (200 l). Nesmí přijít do styku s přímým slunečním světlem. Do lakoven je přiváděn pomocí potrubí, tlak laku je 5±0,5 barů. Lakování se provádí z několika důvodů, kvůli mechanické ochraně, ochraně proti chemickým vlivům – proti chemickým látkám v mycích linkách a ochraně proti UV záření.

Po lakování následuje sušící zóna (infrared zóna), kde dochází k vyhřívání skel na teplotu 75°C za účelem vysušení a odstranění těkavých látek. Teplota zářičů je 100 – 300°C, jsou umístěny po stranách a shora. Délka zářiče je buď 75 centimetrů, který je složen ze tří částí o délce 24,5 centimetrů nebo 50 centimetrů, který je ze dvou částí.

Další proces je UV zóna, z předchozí zóny je lak měkký, tady dochází k jeho vytvrzení. Teplota je 117°C a rychlost dopravníku je 7 m/minutu.

Poslední je temperační zóna pro odstranění vnitřního pnutí a také kvůli tomu, protože po nalakování je na povrchu mírná pomerančová kůra, temperováním se povrch vyhladí. Sklo se zahřeje přibližně na teplotu tání 120 – 130°C a tím dochází ke konečné úpravě skla.

Po temperování se skla pomocí běžícího dopravníku pomalu přemísťují ke kontrole, ta je prováděna pracovníky vizuálně, po té jdou skla na balení a expedici.

## 4. Zkoušky na materiálu z polykarbonátu

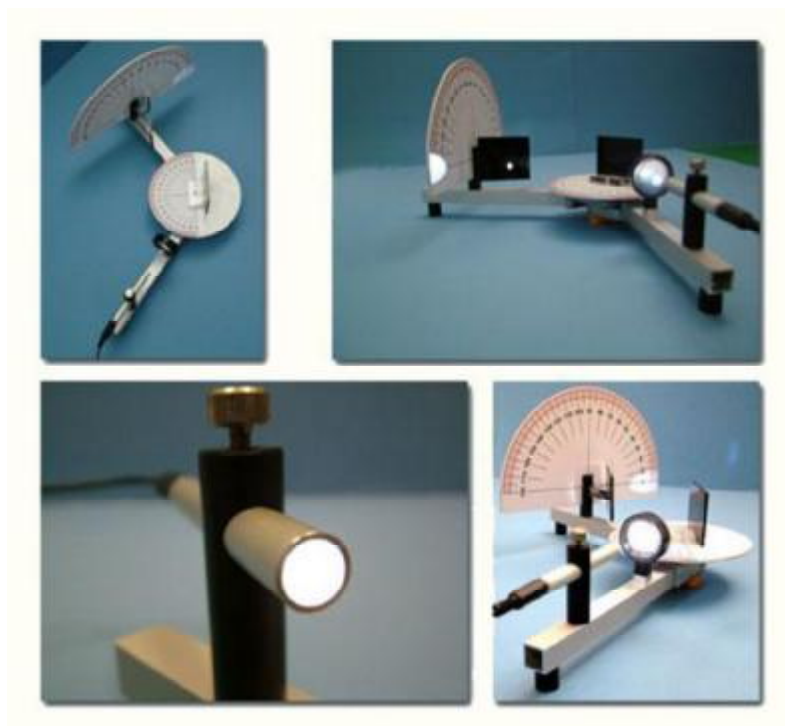
### 4.1 Chování polykarbonátu v chemických látkách

Vady v polymerních materiálech jsou způsobeny často přirozeným napěťovým praskáním ESC (environmental stress cracking). Pro mechanismus ESC je předpoklad, že se týká hlavního řetězce pohybu, který vede k vytvoření malých dutinek. Nanometrové dutinky se shlukují do houfu a stávají se z nich praskliny.[10]

Mechanické vady jsou velmi citlivé na prostředí, ve kterém se nachází, stejně jako stav napětí. Polymery často praskají v nižších napěťových hodnotách, než v rozmezí napětí v kluzu. ESC vzniká vlivem působení molekul, které pronikají z prostředí do materiálu a to vede ke změkčení povrchové vrstvy a tím dochází ke snadnějšímu praskání. K tomu dochází tam, kde je napětí větší než jeho kritická hodnota.[10]

#### Zkoušky:

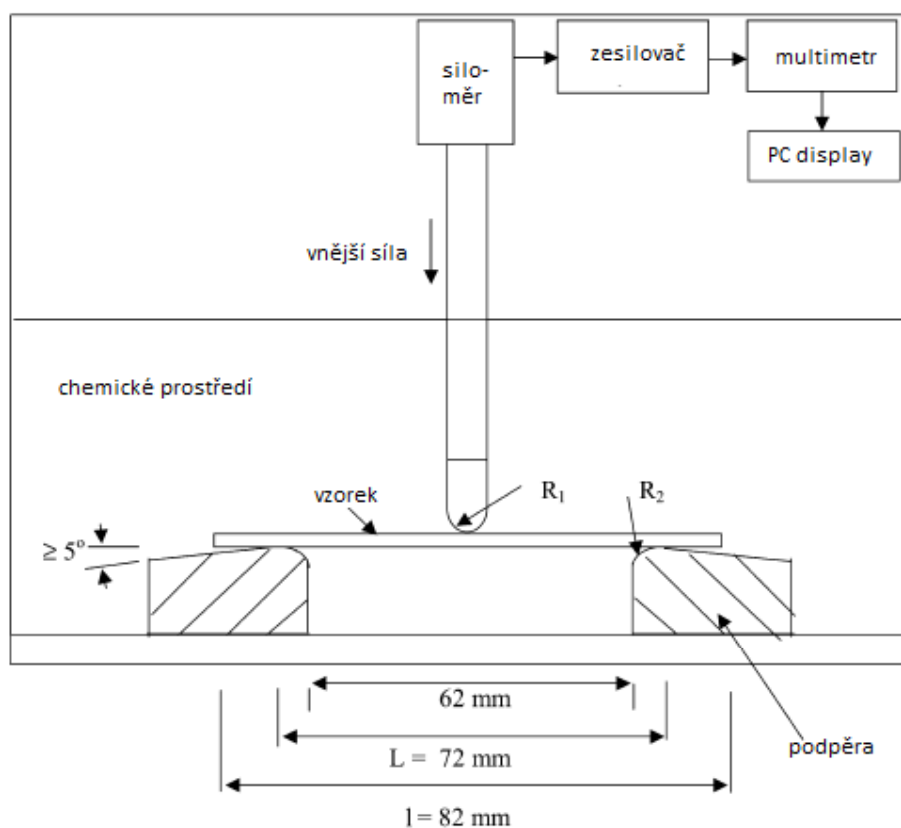
Zkušební vzorky z materiálu Lexan, byly vyrobeny vstřikováním. Základní tvar je „psí kost“ o tloušťce 4mm, délce 150mm, prostřední část je široká 10mm a dlouhá 80mm. Měření residuálního napětí se provádí pomocí jednoduchého polaroskopu (Obr. 4.1)



Obr. 4.1 Polaroskop [10]

Tato zkouška je nedestruktivní. Výsledky testu ukázaly, že žíhané vzorky (zahřáté na teplotu 120°C po dobu 1 hodiny a pomalu ochlazené) mají daleko menší zbytkové napětí v porovnání se vzorky, které se nežihaly. Použité chemikálie jsou isopropyl alkohol, etylen a metanol.[10]

Vybavení pro test je podle normy ISO 178:1993, která byla vyvinuta pro změny polykarbonátového ESC v chemickém prostředí → závislosti napětí na čase. Zkušební zařízení (Obr. 4.2), poloměr  $R_1$  je  $5\pm 0,1\text{mm}$ , poloměr podpěr  $R_2$  je  $5\pm 0,2\text{mm}$ , vzorek je ohnutý ve třech bodech, zasazený do komory s chemickým prostředím a udržované při teplotě  $23\pm 1^\circ\text{C}$ . Po jedné minutě působení, která je dostačující k stabilizování, je chemická látka vložena k vzorku. Změny napětí byly zaznamenány po dobu 72 hodin, každé 2 sekundy citlivým siloměrem spojeným s multimetrem. Mikrotrhliny a trhliny oslabují polymery vystavené chemickému prostředí, mají starší časový interval, než prasknou.[10]



Obr. 4.2 Zkušební zařízení [10]

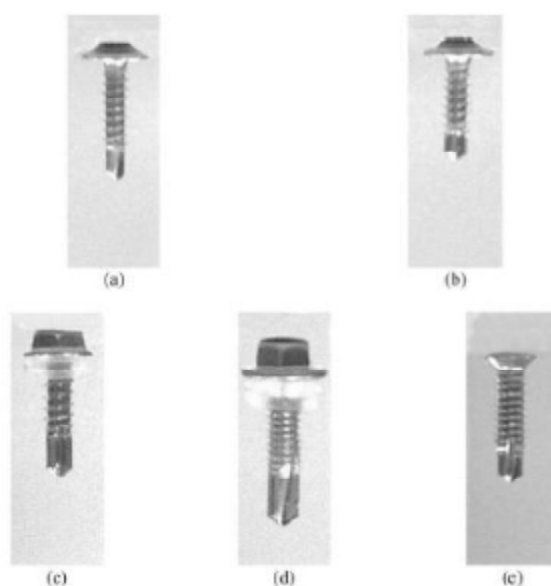
## 4.2 Zbytkové napětí vyvolané navrtáním šroubů do PC desky

Zbytkové napětí se v PC (polykarbonátu) tvoří velice snadno. Při montáži polykarbonátových desek, pro její urychlení se nahradily normální šrouby za samonavrtávací. Polykarbonátová deska a nosný rám jsou zceleny v jednom kroku, tady dochází ke vzniku velkého množství třecího tepla. Naklápění o nějaký menší úhel či třepot během vrtání může vyvolat napětí okolo vrtané díry, to má za následek vznik vad, které se mohou zvětšovat v závislosti na čase nebo na kolísání teplot prostředí.[11]

Pro testování byl nejdříve šroub oddělen z polykarbonátové desky a tak pak byla umístěna pod polariskop pro zobrazení fotoelastické okrajové struktury, která poskytuje informace o maximu smykového napětí v rovině. Provádí se numerická analýza za kombinaci teploty a tlakového rozmístění.[11]

### Zkoušky:

Zkušební vzorky jsou vyrobeny z Makrolonu 3100. Vlastnosti materiálu jsou popsány (Tab. 4.1). Vzorek má rozměry, délka 100mm a šířka 80mm. Pro různé šrouby jsou tři tloušťky, 2mm, 3mm a 4,5mm. Hliníková páska, která se používá v nosném rámu je tlustá 2,4mm. Používané šrouby k testu (Obr. 4.3) o různém průměru a délce. Rozdělení šroubů (Tab. 4.2). Šrouby byly rozděleny do dvou skupin. Do první skupiny patří šrouby C, které jsou vybaveny podložkou, u nich se prováděly testy při změně naklápění při vrtání. Druhá skupina obsahuje šrouby D a E, které slouží k zjištění tlaku a teploty s ohledem na vrtání.[11]



Obr. 4.3 Druhy šroubů (a) šroub A, (b) šroub B, (c) šroub C, (d) šroub D, (e) šroub E [11]

Tab. 4.1 Vlastnosti Makrolonu 3100 [11]

Hustota	1,2 g/cm <sup>3</sup>
Propustnost světla	88 %
Index lomu	1,586
Mez kluzu Rz	63 N/mm <sup>2</sup>
Mez pevnosti v tahu $\sigma$	72 N/mm <sup>2</sup>
Napětí v tlaku $\epsilon_d$	76 N/mm <sup>2</sup>
Modul pružnosti	2400N/mm <sup>2</sup>

Tab. 4.2 Popis šroubů [11]

Šroub	Specifikace	Délka (mm)	Tloušťka PC desky (mm)	podložka
A	M4x1,12	21,7	2	Ne
B	M4x1,70	18,3	4,5	Ne
C	M4x1,40	22,0	2	Ano
D	M5x1,45	28,4	3	Ano
E	M5x1,10	18,8	3	Ne

Experimentální zařízení:

Přenos pomocí fotoelasticity s CCD (Charge Coupled Device) kamerou.[C13] Ta slouží k přenosu optického jasů na elektrické signály, které se pak reprodukují na obraz.[....] Použitá vrtačka musela být před každým vrtáním zkontrolována, hlavně rychlost vrtání a úhel sklonu šroubu. Úhel pro vrtání se nastavil pomocí upínacího systému, který je umístěn přímo na vrtačce, ta je poháněná třífázovým motorem, digitálně řízeným zpětnovazebným převodníkem a výstupní frekvenci 60 Hz.[11]

Postup experimentu:

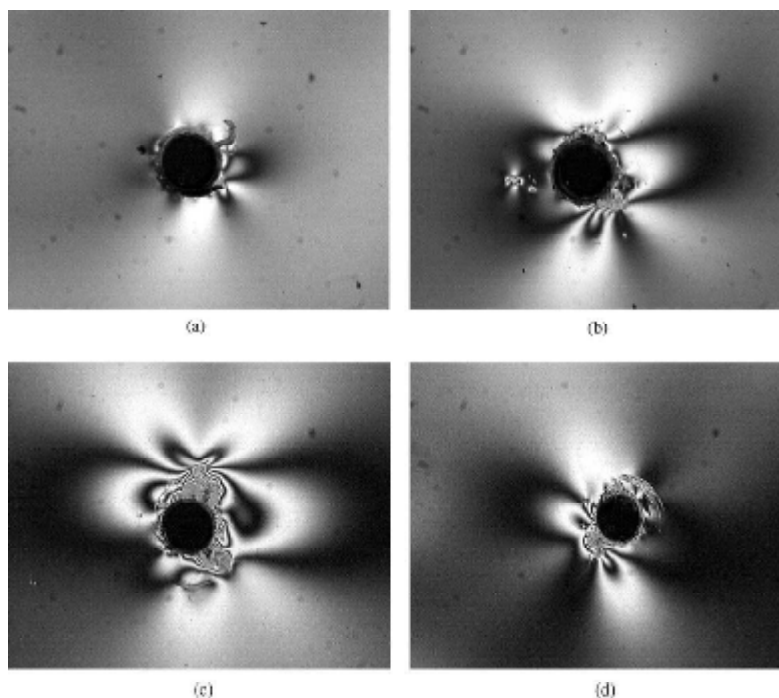
V závislosti nastavení různých tloušťek se objevuje zbytkové napětí u některých šroubů dříve nebo později. Rozdíly mezi vrtáním šroubu C a E, kdy oba šrouby byly v nastavení kolmém na polykarbonátovou desku. Šrouby A, B a C se použily v nastaveném mírném úhlu 0°, 2°, 4° a 6°, rychlost vrtání byla 850 otáček/minutu se zatížením 19,6N. Pro sledování zbytkového napětí se šrouby musely odstranit z desky, která pak byla umístěna pod polariskop ke sledování okrajové struktury. [11]

Výsledky experimentu:

Na obrázku 4.4 pro šroub A je patrný zvyšující se úhel sklonu šroubu  $0^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $4^\circ$  a  $6^\circ$ , kdy dochází k postupnému zvětšování zbytkového napětí.

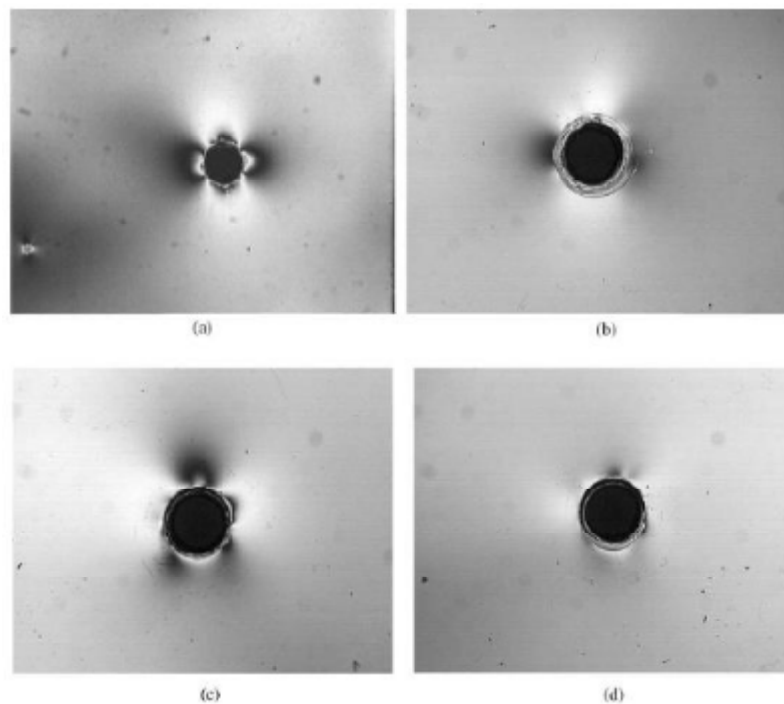
Pokud se zvyšuje úhel sklonu šroubu, tak dochází k nerovnoměrnému rozložení sil na styčné ploše hlavy šroubu a polykarbonátové desky. Na snímku je vidět, že kolem otvoru vznikly vady způsobené vrtáním o určitém sklonu úhlu. Na obrázku 4.5 pro šroub B je zajímavé, že zbytkové pnutí v úhlu  $0^\circ$  na prvním obrázku zleva je vyšší než u ostatních úhlu sklonu. Čím větší úhel sklonu, tím menší zbytkové napětí. U šroubu B je zbytkové napětí mnohem nižší než u šroubu A, důvodem může být, že šroub B je delší a je umístěn v desce o tloušťce 4,5mm, šroub A je kratší a je umístěn ve 2mm tloušťky, je zde rozdíl mezi upínací silou k nosnému rámu. Šroub C (Obr. 4.6) je delší než první dva šrouby. [11]

Zbytkové napětí je kolem otvoru pro úhly  $0^\circ$ ,  $2^\circ$  a  $4^\circ$  je nižší v porovnání s předešlými šrouby. Podložka u šroubu je důležitá pro snížení zbytkových pnutí při vrtání. [11]

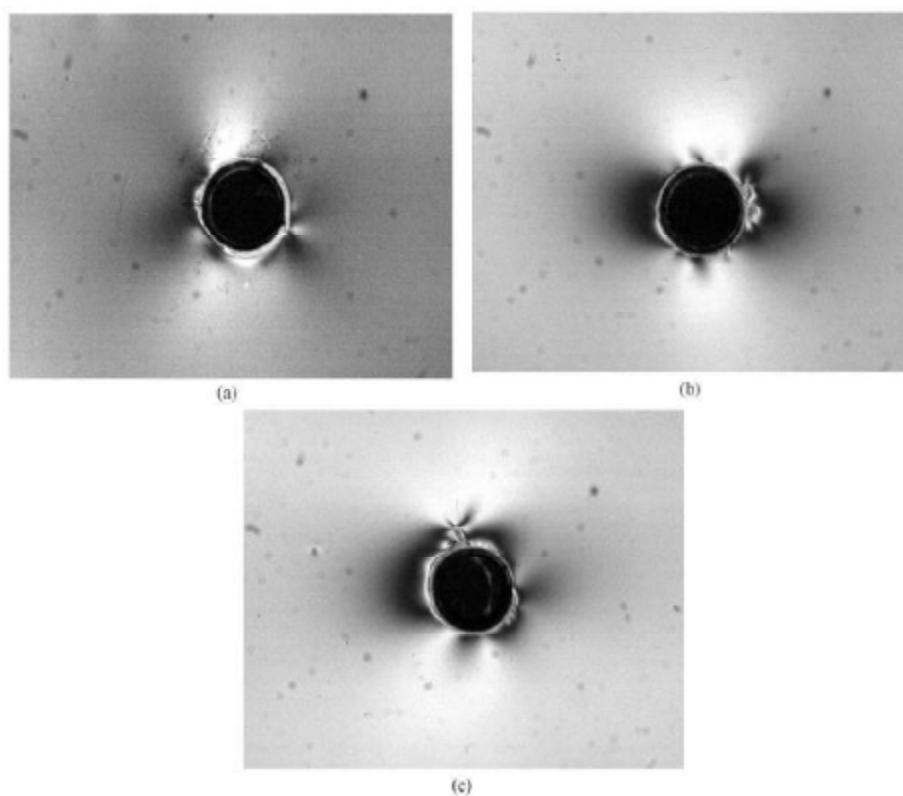


Obr. 4.4 Okrajová struktura zbytkového napětí výsledného navrtáním šroub A v různých úhlech sklonu (a)  $0^\circ$ , (b)  $2^\circ$ , (c)  $4^\circ$ , (d)  $6^\circ$  [11]





Obr. 4.5 Okrajová struktura zbytkového napětí výsledného navrtáním šroub B v různých úhlech sklonu (a)  $0^\circ$ , (b)  $2^\circ$ , (c)  $4^\circ$ , (d)  $6^\circ$  [11]

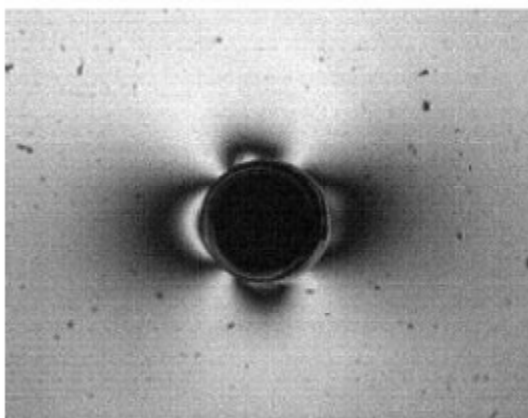


Obr. 4.6 Okrajová struktura zbytkového napětí výsledného navrtáním šroub C v různých úhlech sklonu (a)  $0^\circ$ , (b)  $2^\circ$ , (c)  $4^\circ$  [11]

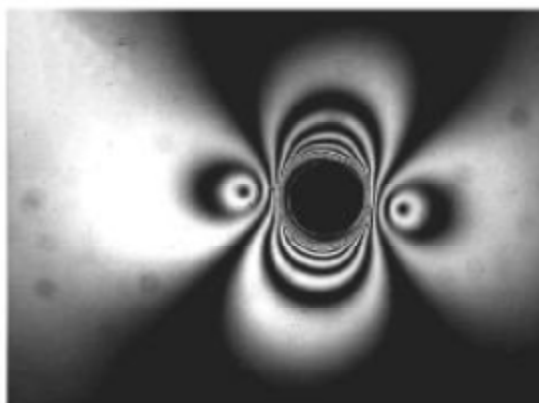
U šroubu D (Obr. 4.7), který je vybaven podložkou je okrajová struktura okolo otvoru symetrická při otáčkách vrtání 1200 ot/min. Na obrázku jsou viditelné dvě černé skvrny, které se nacházejí i na obrázku 3.8 u šroubu E, při otáčkách vrtání 825 ot/min. Rozdíl mezi šrouby D a E je, že D je opatřen podložkou. Černé skvrny z hlediska fotoelasticity znamenají nulovou hodnotu smykového napětí. U šroubu E bez podložky teplo při vrtání vnikalo do PC desky, to mělo za následek dva vzniklé černé body. [11]

Na základě provedení experimentu byly získány tři typy okrajových struktur: [11]

1. Symetrické proužky bez černých skvrn u šroubu s podložkou
2. Symetrické proužky s černou skvrnou u šroubu bez podložky
3. Okraje s hliníkovými kousky



Obr. 4.7 Okrajová struktura zbytkového napětí výsledného navrtáním šroubu D [11]



Obr. 4.8 Okrajová struktura zbytkového napětí vzniklého navrtáním šroubu E [11]

### 4.3 Měření zbytkového napětí v polykarbonátu

Při měření zbytkových napětí se do kovů a skel úmyslně zavádí do povrchu materiálu zbytkové napětí. V provedených testech u vzorků z polykarbonátu tlustého 6,4 mm bylo zaznamenáno zvýšení vrubové houževnatosti, o 6-ti násobek, kdy zbytkové napětí na povrchu materiálu bylo vyrobeno při ohřevu na 160°C a následně ochlazen v ledové vodě. [12]

Pro zkoumání zbytkového napětí se používají tři metody: [12]

1. Odstranění tenkého plátku materiálu frézováním
2. Metoda vrtání slepé díry
3. Fotoelastické měření

#### Příprava vzorku:

Vzorky o velikosti 12,7 x 6,4 x 76 mm se umístěny vedle sebe do trouby, která ve vyhřívaná na 160°C. Celý držák se vzorky se pak přesune do vodní lázně a ochladí se. Vnější plochy vzorků se ochladí a vnitřní část materiálu zůstane horká a poddajná. Širší paprsky vzorku o rozměrech 12,7 x 12,7 x 76 mm, byly zhotoveny pro vrtání otvorů. [12]

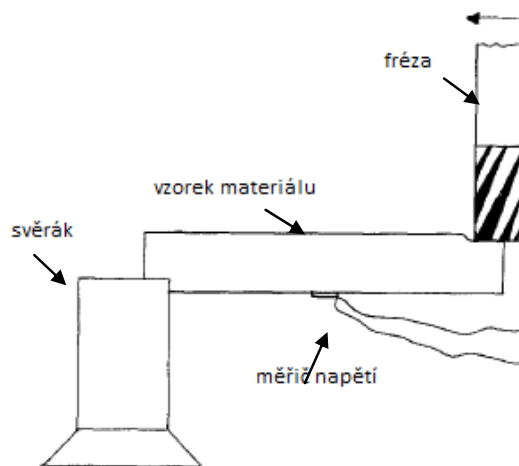
#### 1. Odstranění tenkého plátku materiálu frézováním

Základem je kalený vzorek ve tvaru hranolu (Obr. 4.9), který je připojen k měřiči napětí. Tenký plátek  $A=0,25\text{mm}$  byl odfrézován od horní plochy vzorku, zatím co ten je upevněn ve svěráku. Napětí bylo zaznamenáno před a po frézování. Další odstraněná vrstva P má 0,13mm. V odstraněné vrstvě se zatížení P rovná původnímu průměrnému zbytkovému napětí po celé délce paprsku. [12]

Napětí lze vypočítat podle vzorce:  $\varepsilon = (P/EA) - (Mh_f)/(2EI)$

$P = \sigma_r \cdot t \cdot b$  kde  $\sigma_r$  .... Průměrné zbytkové napětí v odstraněném plátku,  $t$  .... Tloušťka odstraněného plátku,  $b$  .... Šířka plátku vzorku,  $h_f$  .... Konečná výška plátku po odřezání,  $E$  .... Modul pružnosti v polykarbonátu. [12]

Metoda se používá u lineárních elastických materiálů (LEM), přesto že do této skupiny nepatří materiály z polykarbonátu, nepředstavovalo to vážný problém pro vyhodnocení testu. Vypočtené napětí se liší s tloušťkou vrstvy, ta ovlivnila hodnocení zbytkového napětí. Při tloušťce řezu 0,25mm bylo zbytkové napětí 11,8 MPa, při řezu 0,17mm bylo zbytkové napětí vyšší 17 MPa. [12]

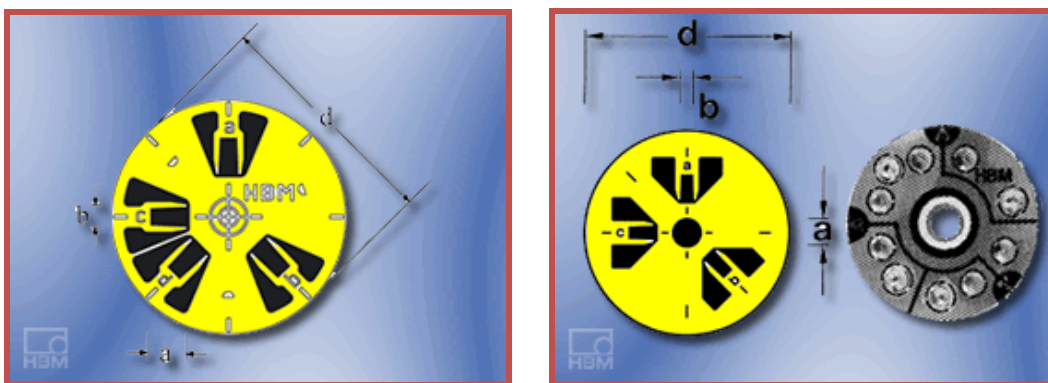


Obr. 4.9 Odfrézování plátku vzorku [12]

## 2. Metoda vrtání slepé díry [12]

Tato metoda je doporučena pro měření zbytkového pnutí pouze pro kovy. Pomocí normy ASTM E837 – 08e1 je popsána tato technika. V tomto testu se vrtají malé díry do povrchu materiálu, kvůli uvolnění zbytkového napětí a změně napětí v okolním materiálu. Napětí je sledováno speciálním měřidlem na obrázku 4.10. Test byl použit na vzorky z polykarbonátu, byly pro něj stanoveny zvláštní kalibrační konstanty, které se vypočítaly z vlastností materiálu za použití normy ASTM E837. Tady se měřidlo namontovalo na polykarbonát vzorku. Kalibrační konstanty jsou zde  $A = -0,345 \times 10^{-6}$  a  $B = -0,562 \times 10^{-6}$ . Směr hlavních zbytkových napětí  $\beta$  vzhledem k napětí v měřidlech lze vypočítat pomocí vztahu:

$$\tan 2\beta = \frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1} \quad \text{kde } \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3 \dots \text{ jsou napětí naměřená v měřicím přístroji.}$$



Obr. 4.10 Přístroj na měření vnitřního pnutí [15]

Výsledky:

V tabulce 4.3 jsou popsány a srovnány výsledky získaných zbytkových napětí metodou fotoelastickou a vrtáním slepé díry. [12]

Tab. 4.3 Získané výsledky zbytkových napětí [12]

Vzorek	Výsledky z fotoelastické metody (MPa)	Výsledky vrtáním slepé díry (MPa)	Úhel hlavního napětí ve slepé díře (°)
1	22,5	7,4	- 26
2	25,1	11,6	- 20
3	16,6	7,8	- 14
4	28,3	4,8	- 3

Všechny čtyři vzorky 12,7 mm široké prošly stejnou tepelnou úpravou, proto by měly mít podobné zbytkové napětí. Fotoelastickou metodou byla průměrná hodnota napětí 25,6 MPa s odchylkou 9%. Metoda vrtání slepé díry nebyla tak přesná, průměrné napětí bylo 7,9 MPa s odchylkou více než 35%. [12]

#### 4.4 Hodnocení zbytkového napětí v přednapěťové fázi pomocí digitálního zpracování obrazu fotoelastického povlaku a metodou navrtávání děr

Zkombinováním dvou metod, digitálním zpracováním obrazu a navrtáváním děr bylo vyvinuto k určení velikosti zbytkového napětí v přednapěťové fázi. Vzorek, při testování byl vystaven jednoosému tlakovému zatížení. V digitálním zpracování obrazu, byly optické údaje převedeny na hodnoty zbytkového napětí. Hodnocení bylo prováděno pomocí měření v rovině a vytvořením malého otvoru v materiálu. Velikost aplikovaného napětí byla vypočítána a srovnána s původními hodnotami v určeném vzorku. [13]

Výrobní vady většinou nevznikají kvůli napětí z velkého užívání zatížení, ale kvůli přednapěťovému ztrátám. Ty se nejčastěji tvoří během výrobního procesu. Proto se zjišťuje zbytkové napětí metodou navrtávání děr. Jde o měření změn napětí po vyvrtání otvoru. [13]

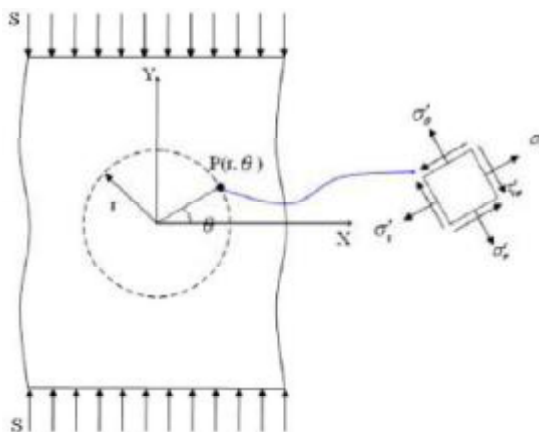
Pro měření je nutné mít díry vyvrtané přesně uprostřed měřící růžice, aby nedocházelo k chybám, pak se napětí měří pomocí fotoelastické techniky, která vygeneruje okrajové napětí kolem navrtaného otvoru. Výhodou je přesné sbírání dat, měření celé oblasti povrchu, na kterém se rozkládá napětí. Velikost zbytkového napětí se stanoví pomocí výpočtů. Výsledky pak byly srovnány s počátečními hodnotami napětí.[13]

Vztah mezi navrtanou dírou a reflexní fotoelasticitou: [13]

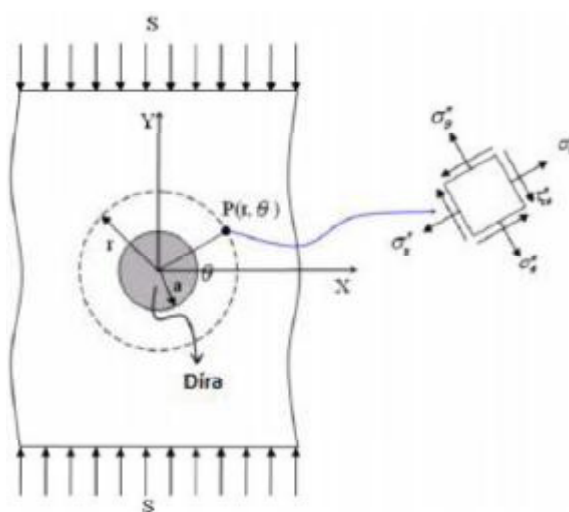
$$\sigma'_{rr} = \frac{S}{2}(1 - \cos 2\theta) \quad \sigma'_{\theta\theta} = \frac{S}{2}(1 + \cos 2\theta)$$

$$\tau'_{r\theta} = \frac{S}{2} \sin 2\theta$$

Vzorek byl nejdříve vystaven stejnému jednoosému tlakovému napětí. Kde je radiální normálové napětí, tangenciální obvodové napětí, radiální – tangenciální smykové napětí v polárních souřadnicích, S jednoosé tlakové napětí.[13]



Obr. 4.11 Označení pole napětí [13]



Obr. 4.12 Značení otvoru vrtání [13]

Fotoelastický povlak byl držen na povrchu vzorku po zavedení zátěže. Po vyvrtání díry, bylo vyhodnoceno maximální smykové napětí okolo díry.

$$\tau_{\max} = \frac{E^s}{2(1 + \nu^s)} N f_\varepsilon$$

$\tau_{\max}$ : Maximální smykové napětí

$E^s$ : Elastická konstanta fotoelastického povlaku

$\nu^s$ : Poissonův poměr fotoelastického povlaku

$f_\varepsilon$ : Fotoelastická konstanta nanášeného materiálu

#### Skryté digitální zpracování obrazu:

Při použití bílého světla s tmavými kruhovým polariskopem, lze rovnice pro výpočet okamžité intenzity svitu trikolóry RGB. Kde  $k$  je vlnová délka,  $R(\lambda)$ ,  $G(\lambda)$ ,  $B(\lambda)$  je rozsah tří barev: červená, zelená a modrá.[13]

$$f_R(x, y, t) = \int_0^\infty F(x, y, t) R(\lambda) d\lambda$$

$$f_G(x, y, t) = \int_0^\infty F(x, y, t) G(\lambda) d\lambda$$

$$f_B(x, y, t) = \int_0^\infty F(x, y, t) B(\lambda) d\lambda$$

Z rovnice byly získány odpovídající odstíny šedi. Získané výsledky předznačených bodů jsou popsány v tabulce 4.4. Tabulka se používá pro stanovení úrovně šedi s přesností na 0,005 – 0,003 pixel. Úrovně šedi R, G, B jsou přímo spojeny s okraji. Proto kalibrační nosník a napěťový vzorek jsou povlečeny stejným fotoelastickým tenkým filmem, kalibrační hodnoty jsou použitelné pro vyhodnocení izochromatického kraje vzorku.[13]

Tab. 4.4 Odpovídající úrovně šedi [13]

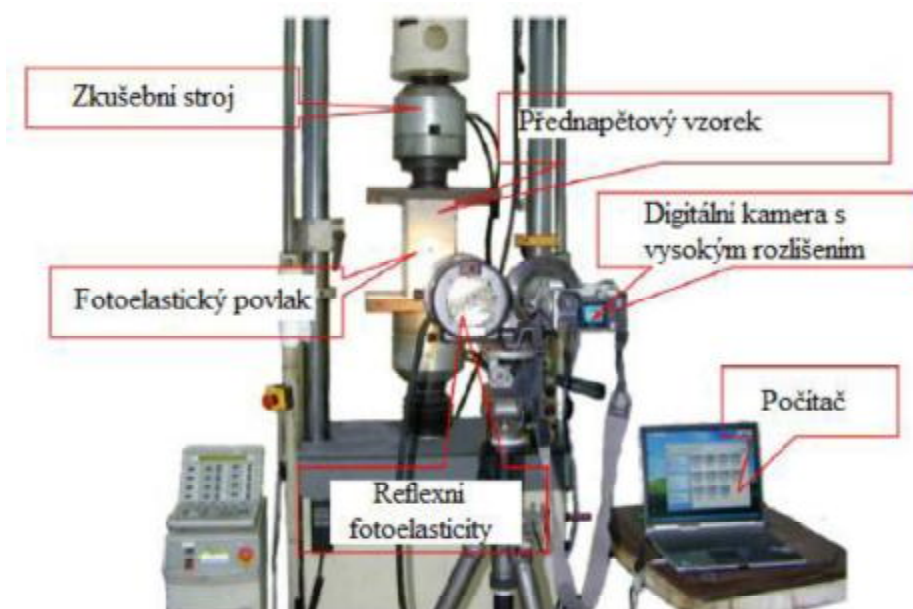
Stupeň šedi	Izochromatický okraj vzorku (N)			
	0	0,25	0,5	0,75
R	171	253	253	255
G	190	251	250	215
B	177	252	241	53
	1	1,25	1,5	1,75
R	72	228	252	253
G	228	254	251	233
B	250	248	233	173
	2	2,25	2,5	2,75

R	254	111	238	255
G	186	255	252	223
B	255	210	195	218
	<b>3</b>	<b>3,25</b>	<b>3,5</b>	<b>3,75</b>
R	255	163	161	229
G	199	255	250	162
B	248	190	137	178

#### Postup experimentu:

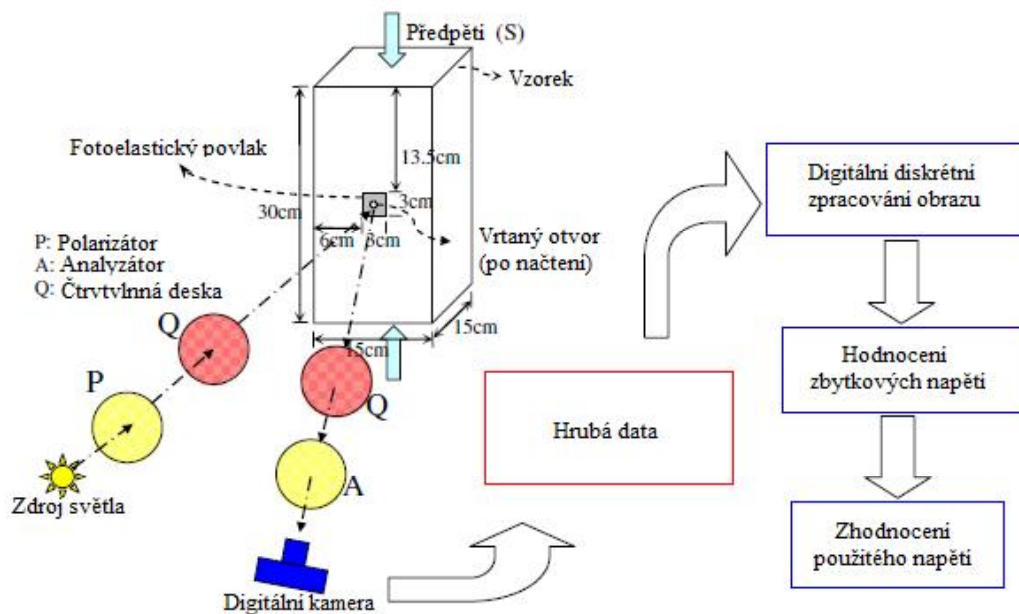
K experimentu bylo nutné použití kamery s vysokým rozlišením. Získané okrajové struktury byly zpracovány digitálním skrytým systémem zpracování obrazu. Experimentální přístroj je zobrazen na obrázku 4.13. Postup zpracování experimentu je vidět na obrázku 4.14.[13]

Obraz se natočil na kameru a byl převeden do počítače, který obraz zpracoval s rozlišením 512x512 pixelů x 8 bitů. Rozměry testovaného materiálu byly vzorky odbelníkového tvaru a rozměrech 15 x 15 x 30 cm. Pak byl aplikován fotoelastický povlak lepením na povrch vzorku. Poté se vyvrtal malý otvor kolmo k povrchu materiálu. Zbytkové napětí, které vzniklo vyvrtáním díry, bylo změřeno reflexní fotoelastickou metodou, kde průměr otvoru byl tři milimetry. Hloubky děr byly od 0,5 do 2,5 centimetru. [13]



Obr. 4.13 Experimentální přístroj [13]

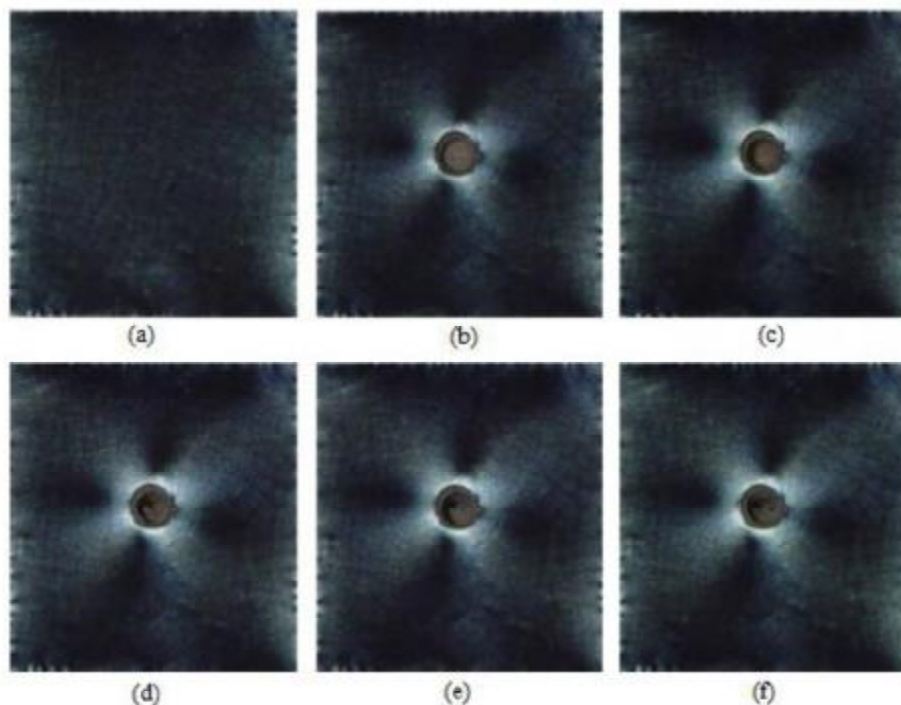




Obr. 4.14 Postup zpracování experimentu [13]

Výsledky experimentu: [13]

Při hloubce děr od 0 do 2 centimetru se zbytkové napětí zvětšuje, od 2 centimetrů se zbytkové napětí už nemění. Na obrázku 4.15 je patrné napětí kolem celého vyvrtaného otvoru.



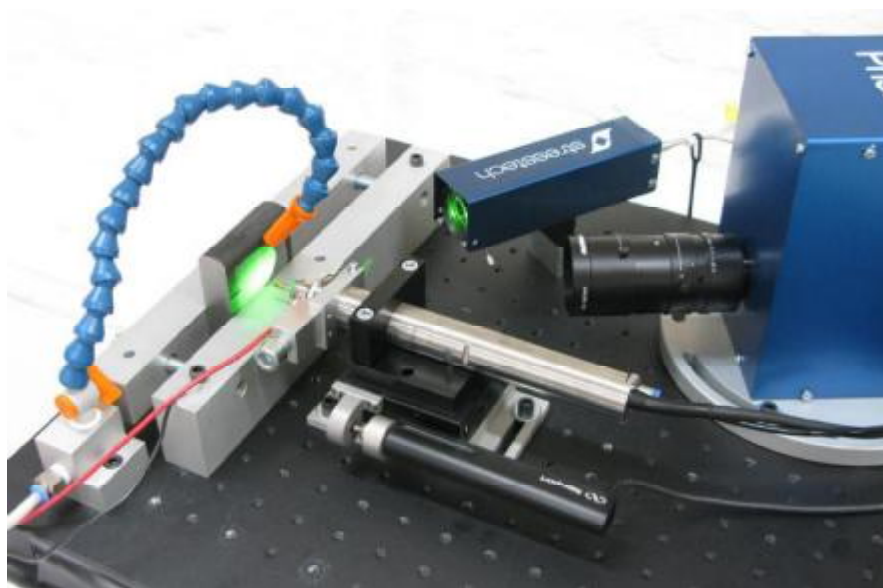
Obr. 4.15 Zbytkové napětí v různých hloubkách děr (a) 0cm, (b) 0,5cm, (c) 1cm, (d) 1,5cm, (e) 2cm, (f) 2,5 cm. [13]

#### 4.5 Měření zbytkového napětí metodou PRISM

Prism měří zbytkové napětí v různých materiálech způsobem vyvrtání otvoru a porovnání pomocí laserového obrazu oblasti kolem otvoru před a po vrtání. Snímky zachycují vliv napětí v důsledku odstranění materiálu vrtáním. Poskytnutím informací o materiálových vlastnostech a nastavení geometrie, software může rychle vypočítat rovinné zbytkové napětí pro jednu hloubku anebo hloubku profilu po vícenásobném vrtání. Tato technologie měření využívá napětí – uvolnění, kde se malý otvor vyvrtá do materiálu a tím dojde k uvolnění napětí podél hranice otvoru.[14]

Standardní Prism systém je složen z počítače a monitoru pro získání a prohlížení obrázků, laserový zdroj světla, osvětlení, video hlavice a vysokorychlostní vrtačky. Systémový software je zcela kompatibilní s hardwarem. Přístroj lze snadno nastavit a je lehce ovladatelný. Měření je velmi přesné a rychlé.[14]

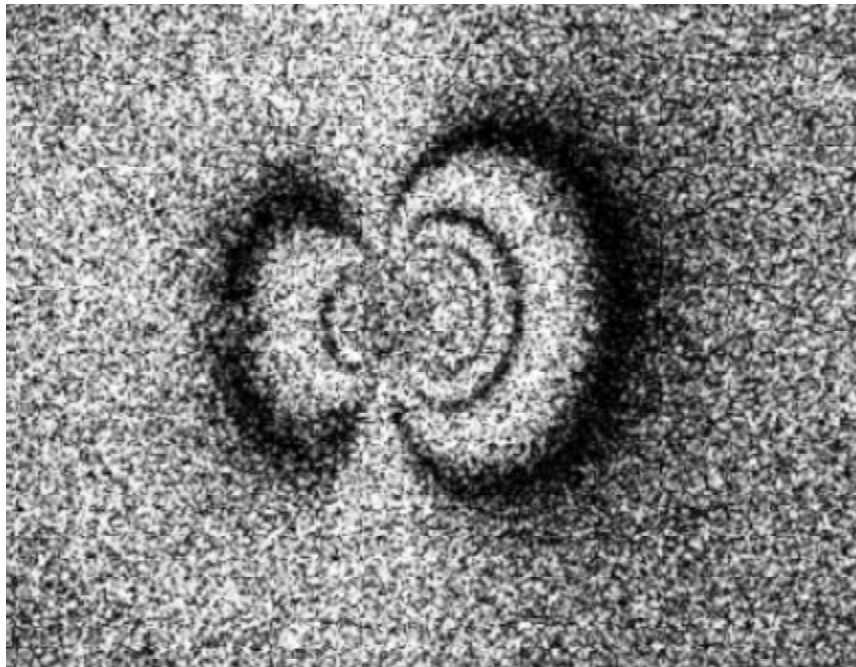
Mezi výhody tohoto zařízení lze zařadit rychlost - měření a analýza je hotová do pěti minut, vysoké rozlišení – sledování změn napětí při měření menším než 7 MPa, přizpůsobivost – cenově dostupné řešení navržené pro danou aplikaci, přesnost.[14]



Obr. 4.16 Zařízení na měření[14]

Vrtání otvoru:

Toto měření je považováno za polo - destruktivní metodu. Materiál se odstraní vrtáním malého slepého otvoru do měřené součásti.[14]



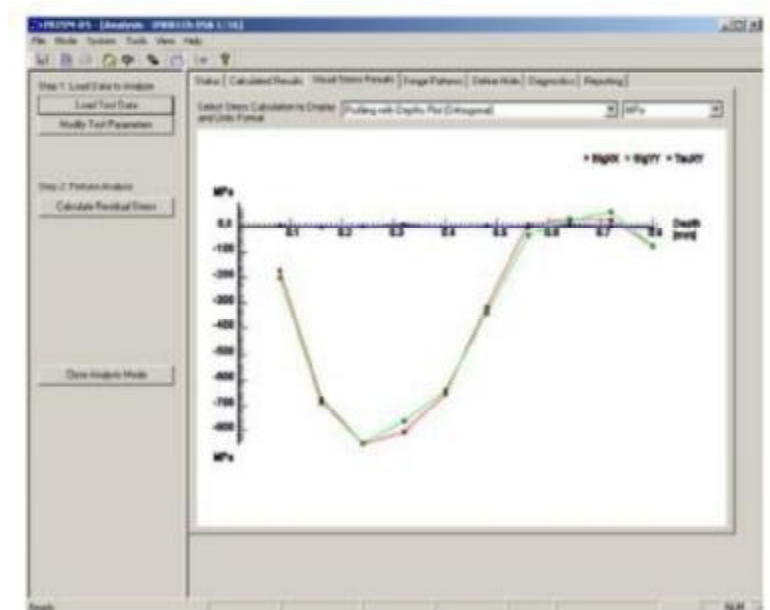
Obr. 4.17 Příklad skvrnitého obrazce u vrtané díry[14]

Postup měření:

Postup začíná od místa umístění hrotu vrtáku na povrchu vzorku. Prism detekuje povrch elektrickou kontaktní metodou, kde se vrták pohybuje směrem k součásti, dokud nezačne proces vrtání. Pak se stanoví seznam hloubky vrtání a spustí se sběr dat. Jednotlivé kroky vrtání se provádí automaticky. Laserové snímky povrchu jsou přijímány po každém kroku vrtání. Jeden snímek se přidává pro stanovení polohy otvoru a zvětšení obrazu.[14]

Software Prism:

Tento software spojuje vrtání a zobrazování. Měření probíhá zcela automaticky podle předem stanoveného seznamu hloubek vrtaných děr anebo lze hloubku během vrtání měnit. Výstupní data jsou ve formě grafického obrazu a ve formě tabulky. Prism data ukládá v databázi. Snadné uspořádání složek měření. Software umožňuje přezkoumání a úpravu parametrů měření.[14]



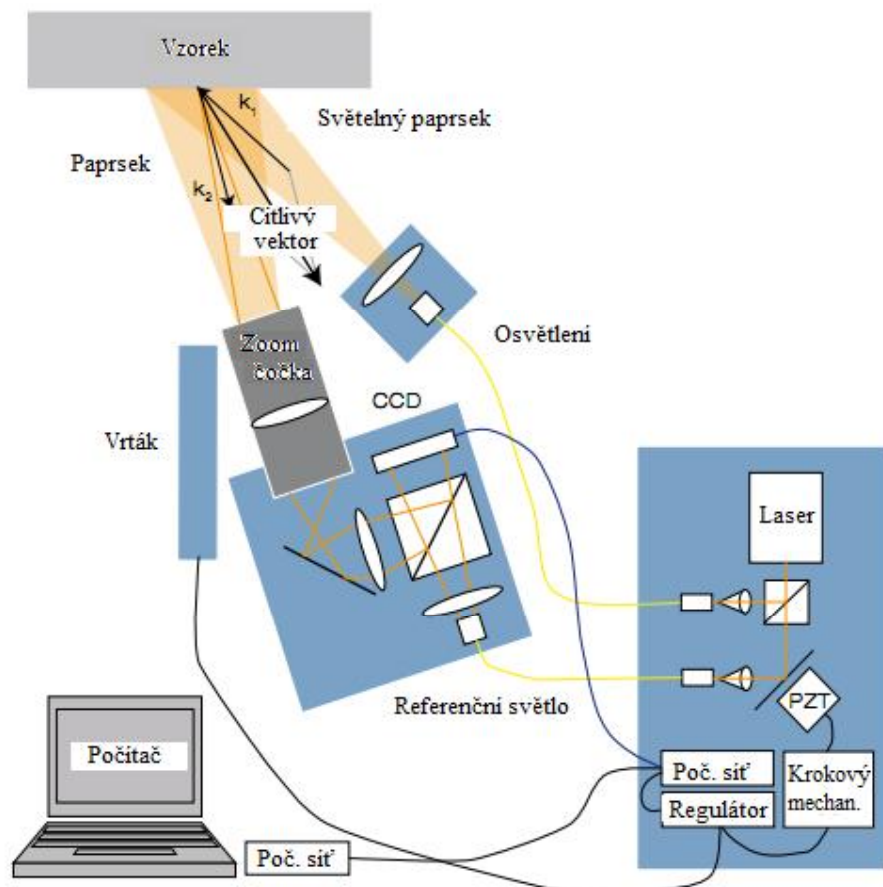
Obr. 4.18 Grafické výsledky pro výpočet napětí[14]

#### Výsledky měření:

Hodnoty napětí vzorku jsou vypočítány pro souřadnicový systém v horizontálním a vertikálním směru a smykové napětí. Po přírůstkovém vrtání díry je předpokládáno nejednotné napětí.[14]

#### Technické parametry:

Systém obsahuje laser s maximálním výkonem 20 mW při vlnové délce 790 – 820 nm. Systém spolupracuje s mnoha systémy např. Windows Vista a Windows XP.[14]



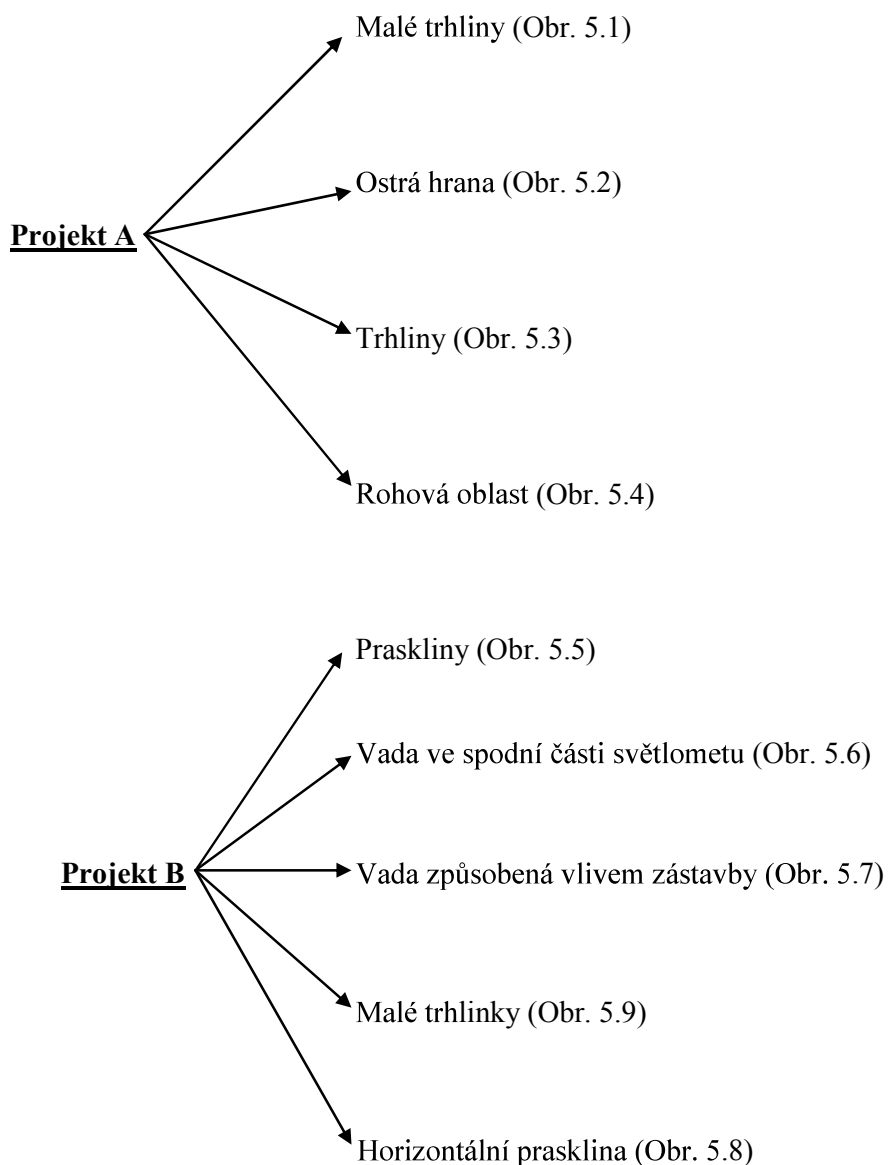
**Obr. 4.19 Schéma zařízení potřebné k měření [14]**

## 5. Rozbor vad světlometů a příčiny jejich vzniku

V rámci práce jsou dva projekty A, B. Na těchto dvou používaných dílech v automobilovém průmyslu jsou problémy a vadami, které jsou dále popsány a zdokumentovány.

Definice vady: Vada je porušení materiálu mikroskopických nebo později i makroskopických rozměrů, ke které dojde důsledkem působení vnitřních a vnějších nepříznivých vlivů nebo jejich kombinací což má za následek narušení jak celistvosti materiálu, tak i jeho funkčnosti.

Rozdělení vad:



## 5.1 Projekt A

Na obrázku 5.1 je patrná vada v horní oblasti nad poziční žárovkou. Tato vada vznikla vlivem vysoké teploty, kdy vznikají malé trhliny, které se postupem času zvětšují.



Obr. 5.1 Malé trhliny

Na snímku 5.2 jsou vady ve spojení se spodní oblastí světlometu a ostrou hranou, malé tloušťky laku, nechráněné oblasti a působením ostříkovací kapaliny (viz. Příloha E).



Obr. 5.2 Ostrá hrana



Další vada na obrázku 5.3 se projevuje při dlouhodobém tepelném zatížení, kdy dochází ke zvětšení mikrotrhlin na trhliny o velikosti 3 centimetry.



Obr. 5.3 Trhliny

Na obrázku 5.4 se nachází vada v rohové oblasti světlometu. Tato vada vznikla působením ostřikovací kapaliny a zástavby světlometu. Upevněním v automobilu dochází k mechanickému zatížení („klepání blatníku“)



Obr. 5.4 Rohová oblast



## 5.2 Projekt B

Na snímku 5.5 v celé horní oblasti světlometu se nachází vada, která vznikla vlivem působení vnitřního pnutí polykarbonátového skla a také vlivem působení teploty a oštríkovací kapaliny.

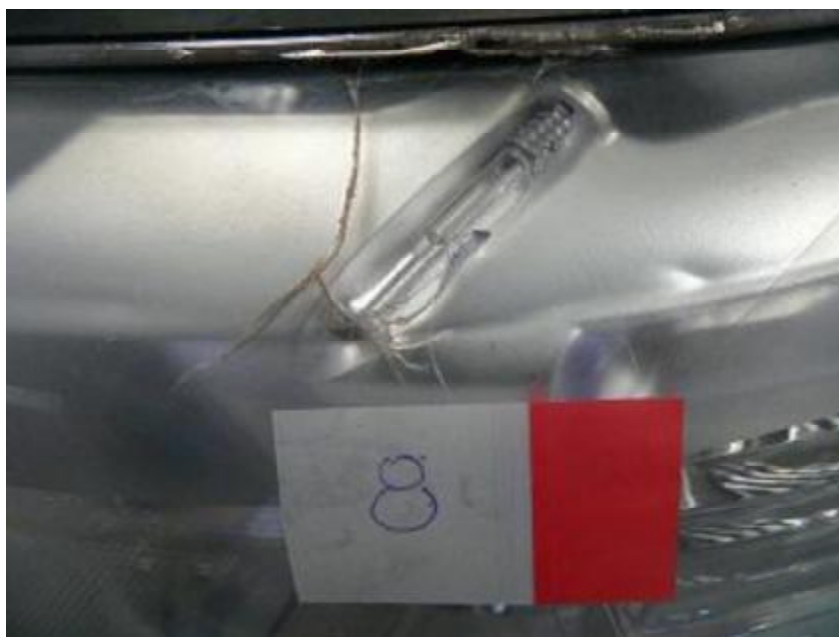


Obr. 5.5 Vada v horní oblasti

Vada světlometu je vidět ve spodní oblasti na snímku (Obr. 5.6) vznikla vlivem vysokého napětí při „zacvakávání“ rámečku do skla polykarbonátu.



Obr. 5.6 Vada ve spodní oblasti světlometu



**Obr. 5.6.1 Rozšíření praskliny**

Na obrázku 5.7 je patrná vada v boční oblasti světlometu, způsobena vlivem ostré hrany, zástavby světlometu v automobilu působením nárazu na blatník.



**Obr. 5.7 Vada ve spodní boční oblasti**

Na obrázku 5.8 a 5.9 se nachází horizontální prasklina v 1/3 světlometu v podélném směru. Vznikla působením teploty a ošťikovací kapaliny, poškozením laku odlétávajícími kamínky při provozu automobilu a také vlivem zástavby působením tlaku kapoty a tlaku blatníku.



**Obr. 5.8 Podélná trhlinka**

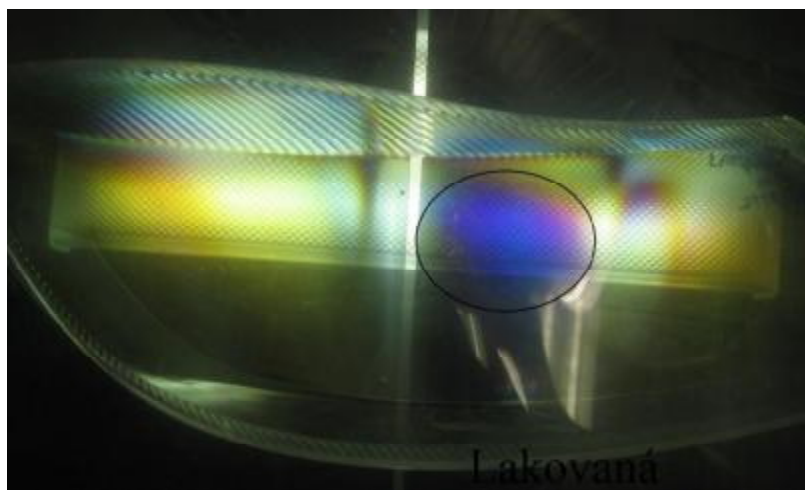
Na posledním obrázku 5.9 jsou vidět malé trhlinky v oblasti tlumeného světla a vlivem vysoké teploty, poškození laku za provozu a vlivem ošťikovací kapaliny.



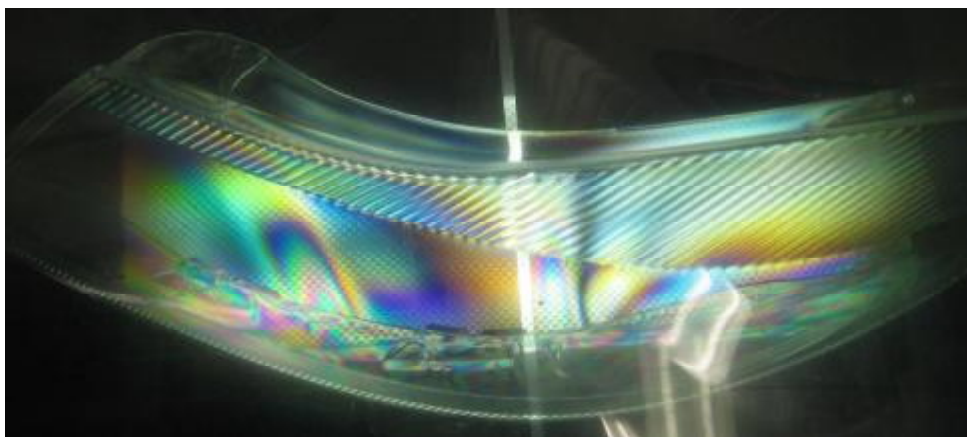
**Obr. 5.9 Malé trhlinky**

### 5.3 Zkoumání opticky aktivních látek

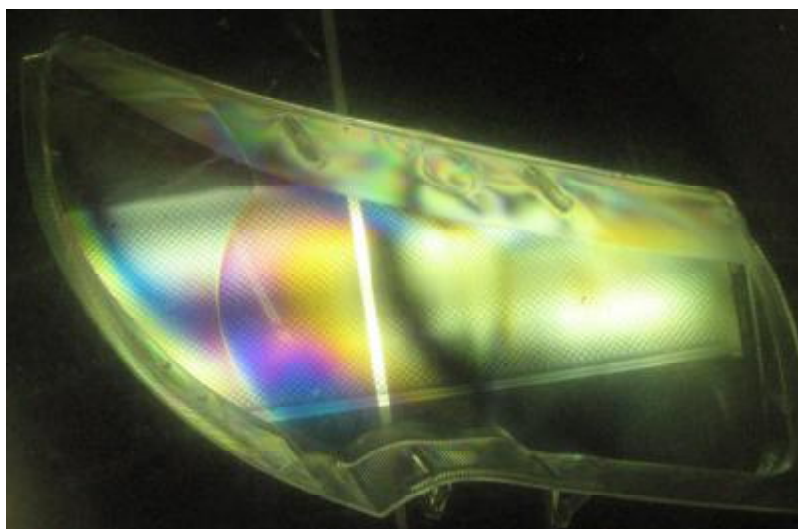
Ke zkoumání opticky aktivních látek se používá polarizovaného světla - je to metoda fotoelasticimetrie. Opticky aktivní látky jsou schopné stáčet kmitovou rovinu polarizovaného světla. Při průchodu polarizovaného světla materiálem se objeví charakteristické obrazce, podle kterých můžeme následně posoudit nebo odhadnout, kde by se mohla vyskytnout neboli vzniknout vada v průběhu používání anebo odhalit vada skrytá.[16] Na obrázku 5.10 je zobrazen projekt A v polarizovaném světle a na obrázku 5.11 je projekt B. Na obou snímcích můžeme sledovat patrné zbarvení materiálu, kde nejtmavší odstín znamená, že to je místo, kde by mohla vzniknout prasklina.



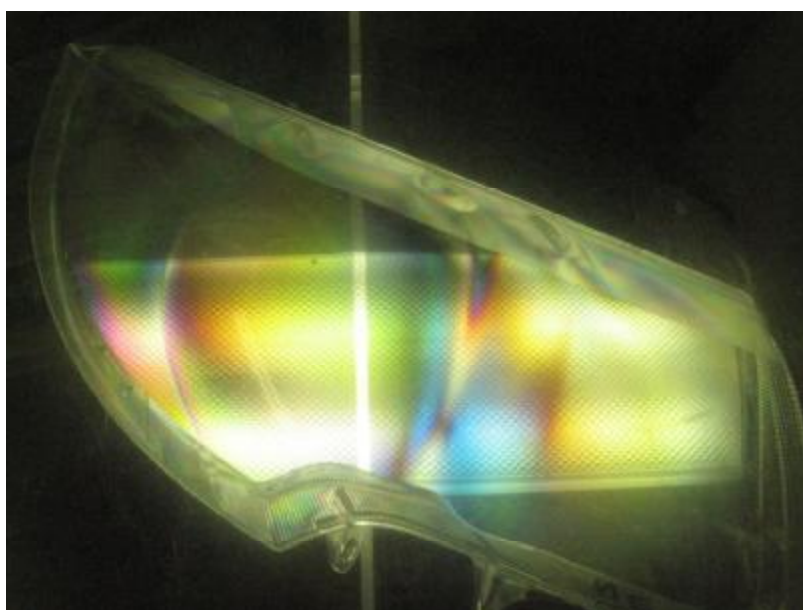
Obr. 5.10a Projekt A - lakovaný



Obr. 5.10b Projekt A - nelakovaný



**Obr. 5.11a Projekt B - lakovaný**



**Obr. 5.11b Projekt B - nelakovaný**

## 6. Návrh metodiky experimentálních ověření zbytkového napětí

Ve své diplomové práci se věnuji studiu zbytkových napětí v polykarbonátu. Měřené výrobky se vylisují a poté projdou povrchovou úpravou. Vzhledem k tomu, že díly z polykarbonátu jsou určitým způsobem zatěžovány, a to jak tepelně, tak i mechanicky, dochází k narušení jejich struktury. Proto se provedlo měření zbytkového napětí odvrtávací metodou. U projektu A a B se měřilo jak na dílech lakovaných, tak i nelakovaných. U projektu B se provedlo i vybroušení vzorků, které mají ostrou hranu.

### 6.1 Odvrtávací metoda

Touto metodou, vyvrtáním slepého otvoru o malém průměru dochází v materiálu k přerozdělení zbytkových napětí. Pomocí tenzometrů se změří deformace na povrchu tělesa a určí se směry a velikosti zbytkových napětí.[17]

#### Pracovní postup:

- 1) Místo, kde bylo uskutečněno měření se nejprve lehce očistilo tkaninou a do jeho středu se přilepil tenzometr pomocí lepidla Z70
- 2) Po té se tenzometr překryl pomocí laku PU 120, důležité k ochraně proti vnějším vlivům
- 3) Nastavení nulového bodu na měřeném objektu
- 4) Postupným odvrtáváním se zvětšovala hloubka otvoru, v tomto případě měření se vrtalo do hloubky 1,5mm po 0,1mm, tudíž se dělalo 15 vrtacích operací
- 5) Pomocí softwaru se vyhodnotila velikost zbytkového napětí

#### Jednosložkové lepidlo Z70:[17]

Je to rychle tuhnoucí hmota bez rozpouštědel. Vytvrzovací rychlost závisí na chemickém složení materiálů. V tomto případě byla doba 10 – 60 sekund.



Tenzometrická růžice:[17]

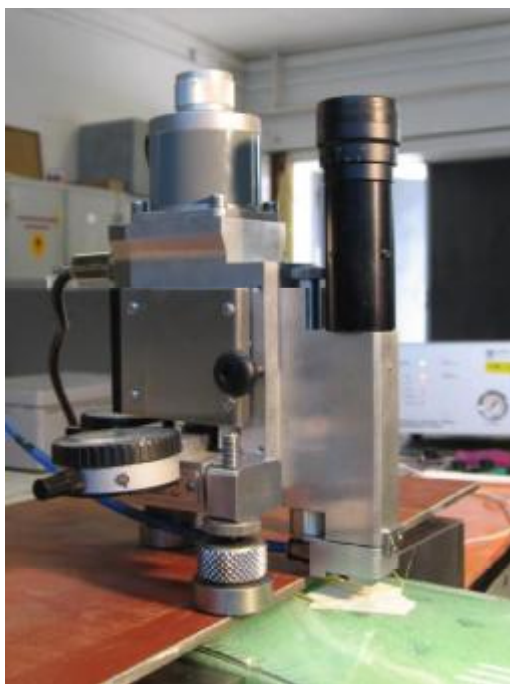
Pro tuto metodu byla použita růžice (HMB RY 61S) se třemi vinutími s natočením  $0^\circ/45^\circ/90^\circ$  kolem středu.



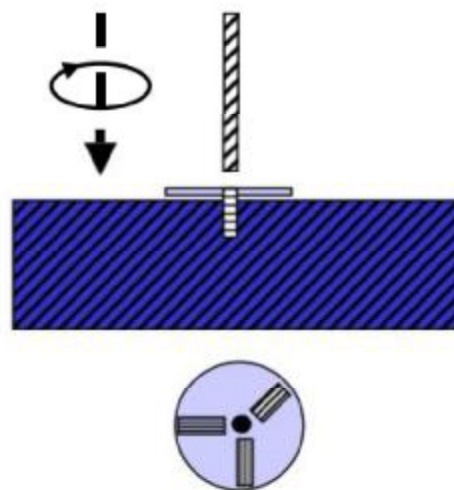
Obr. 6.1 Tenzometrická růžice[19]

Odvrtávací zařízení MTS 3000:

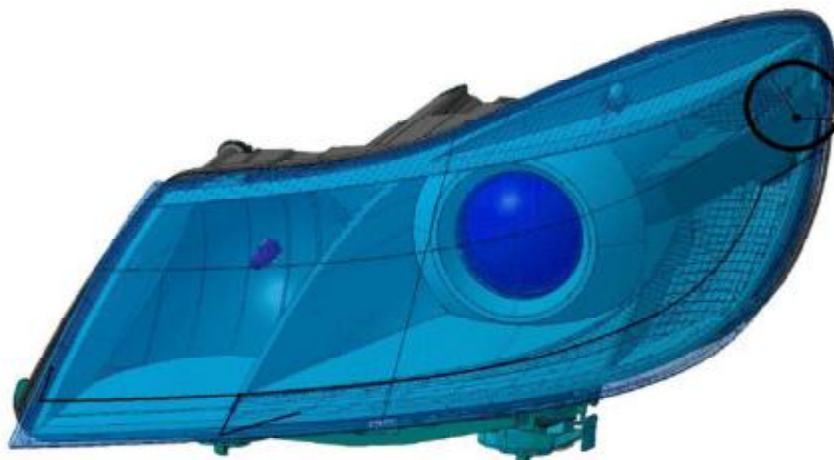
Používá se frézka, která má 30 – 100000ot/min a je zapouštěna po jednotlivých krocích do povrchu materiálu. Proces je automaticky řízen počítačovým softwarem. Odvrtávací zařízení je připojeno ke snímací ústředně EMS DV 802 s nastavením napájení 0,3V.



Obr. 6.2 Odvrtávací zařízení



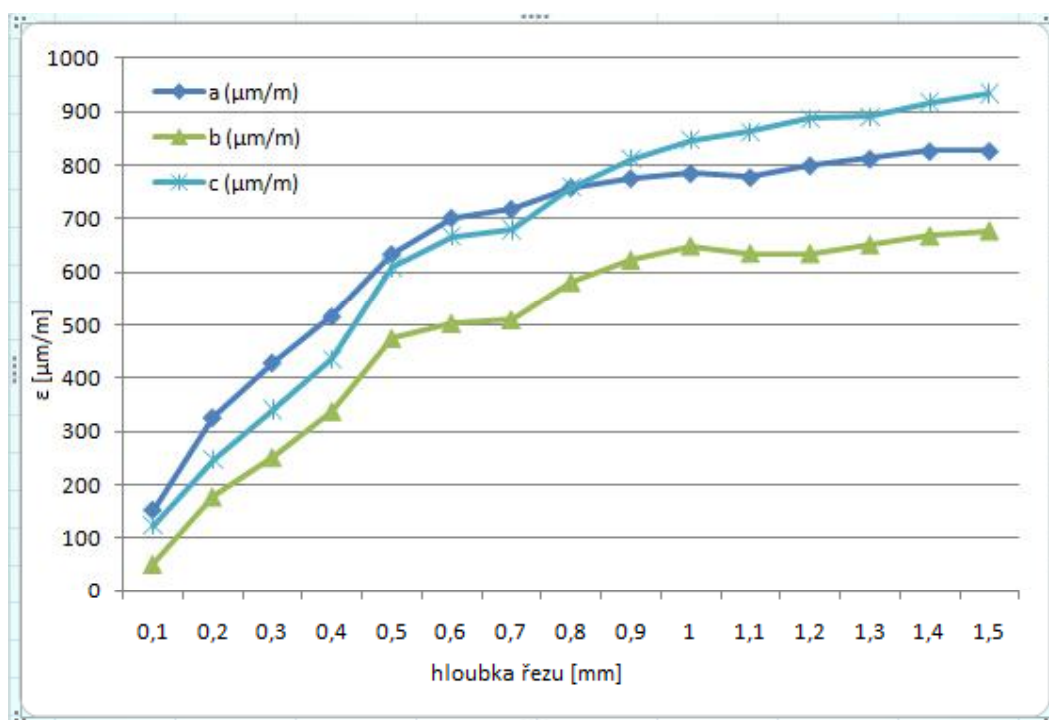
Obr. 6.3 Schéma odvrtávání[18]

**Dosažené výsledky měření:****Projekt A:**

Obr. 6.4 Umístění tenzometru – projekt A

**Výsledné grafy:**

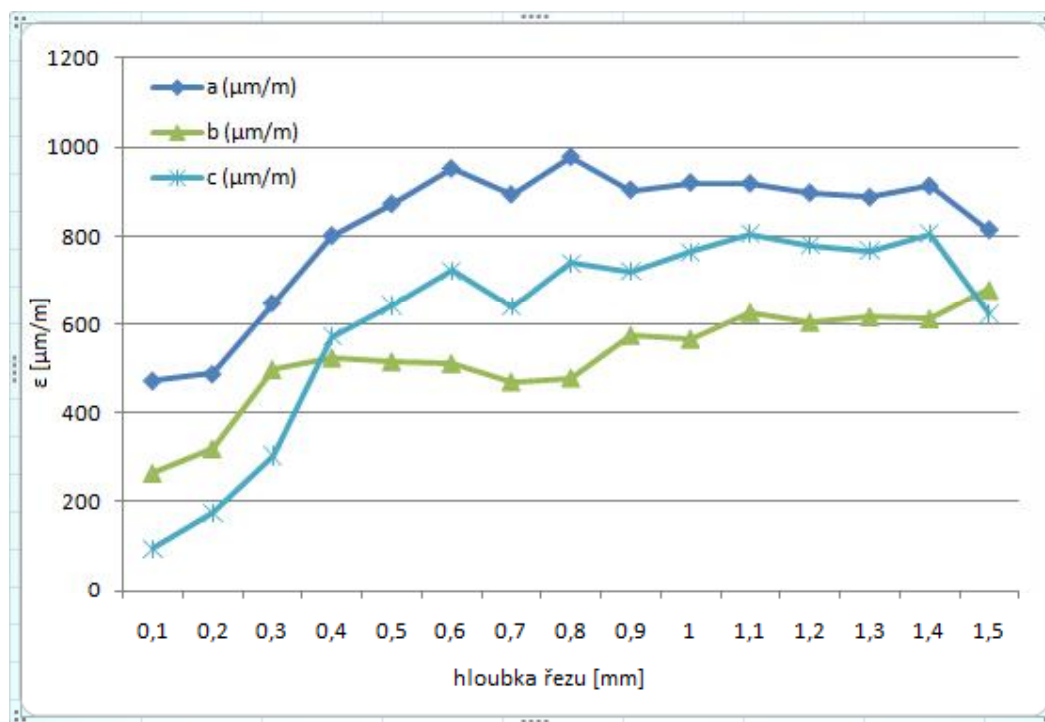
Projekt A – nelakovaný:



Obr. 6.5 Projekt A - nelakovaný

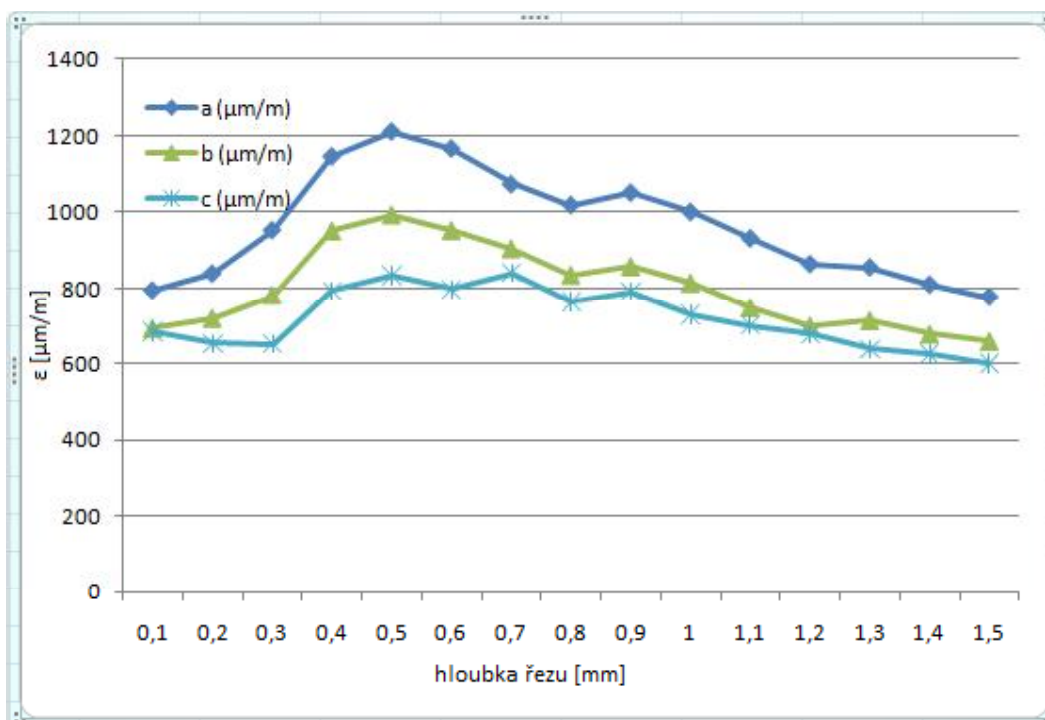


Projekt A – lakovaný:



Obr. 6.6 Projekt A - lakovaný

Projekt A – smontovaný:



Obr. 6.7 Projekt A - smontovaný

**Popis dosažených výsledků měření:**

Orientace tenzometrů **a** – 0° kolmo na okraj, **b** – 135° (45°) na tenzometr, **c** – 0° kolmo na okraj

Sklo nelakované – poměrné deformace  $\varepsilon$  jsou ve všech osách vysoké a mají společný trend

Sklo lakované – největší koncentrace poměrné deformace  $\varepsilon$  je v ose a, všechny deformace zůstaly na stejné úrovni nebo nižší úrovni jako před lakováním. V ose b a c došlo k poklesu a homogenizaci deformace.

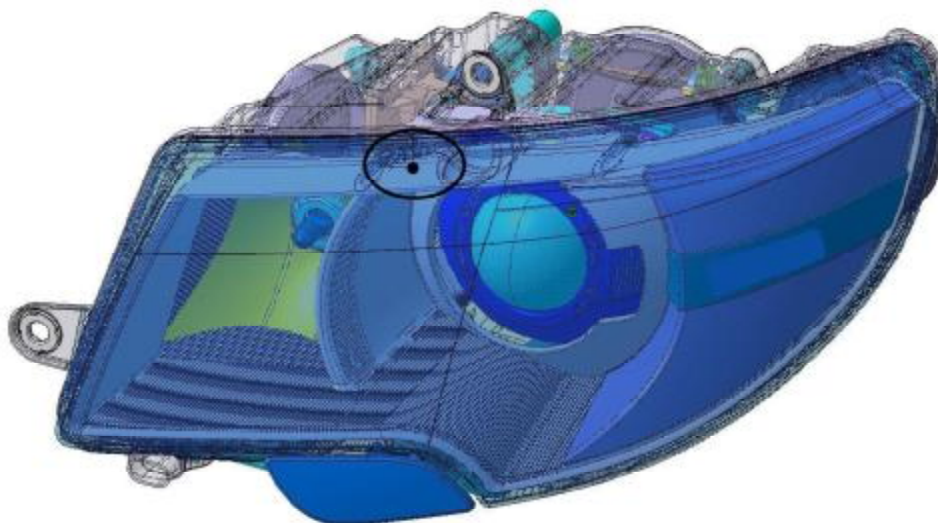
Sklo smontované – největší koncentrace poměrné deformace  $\varepsilon$  je v ose a, ale i v ostatních směrech jsou deformace na velmi blízké úrovni.

**Závěr projektu A:**

- I. Etapa výroba: Sklo po vylisování má největší deformace ve všech směrech.
- II. Etapa lakování: Po tepelných úpravách spojených s procesem lakování, dojde k rovnoměrnému rozložení deformace, což lze přirovnat k procesu žíhání. Tento proces má na stav skla pozitivní důsledky. Nicméně tento vliv není tak velký jako u předchozího modelu.
- III. Etapa montáž: Po montáži do rámu světlometu dojde přerozdělení deformací a 20–40 % nárůstu napětí ve všech směrech, což může vést, dle parametrů materiálových a geometrických, k zpevnění konstrukce skla, ale zároveň ke snížení elasticity a větší náchylnosti na inicializaci trhliny. Hlavní směr deformace, která bude rozhodující měrou přispívat ke vzniku trhlin, je osa c, která je rovnoběžná s osou světlometu.



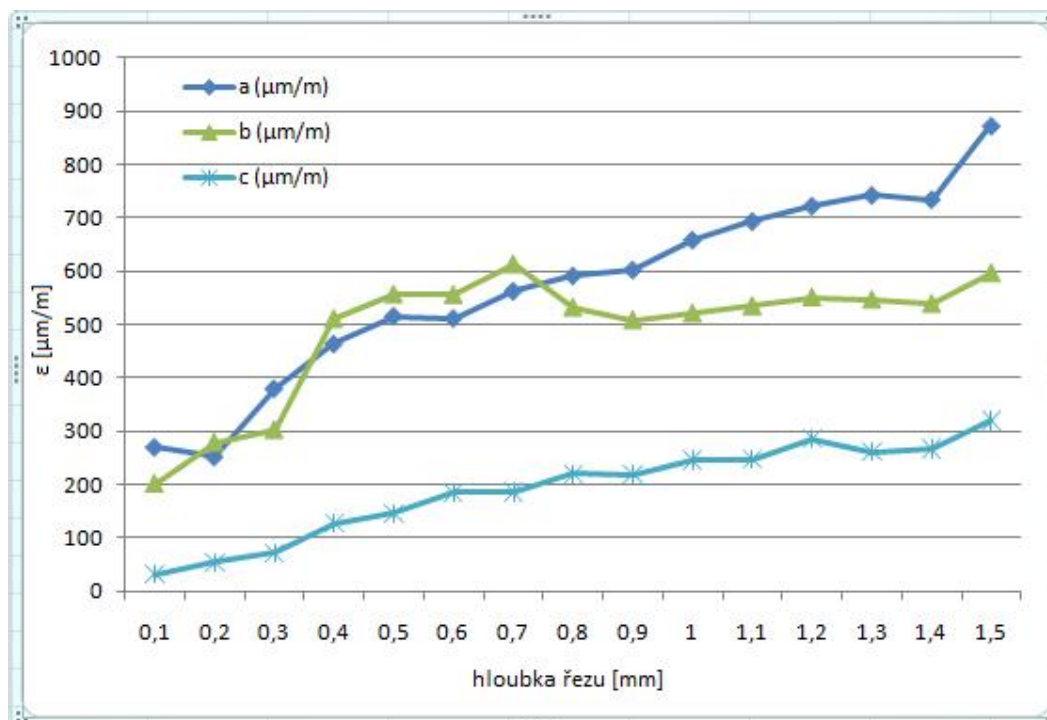
Obr. 6.8 Lakovaný projekt A

**Projekt B:**

Obr. 6.9 Umístění tenzometru - projekt B

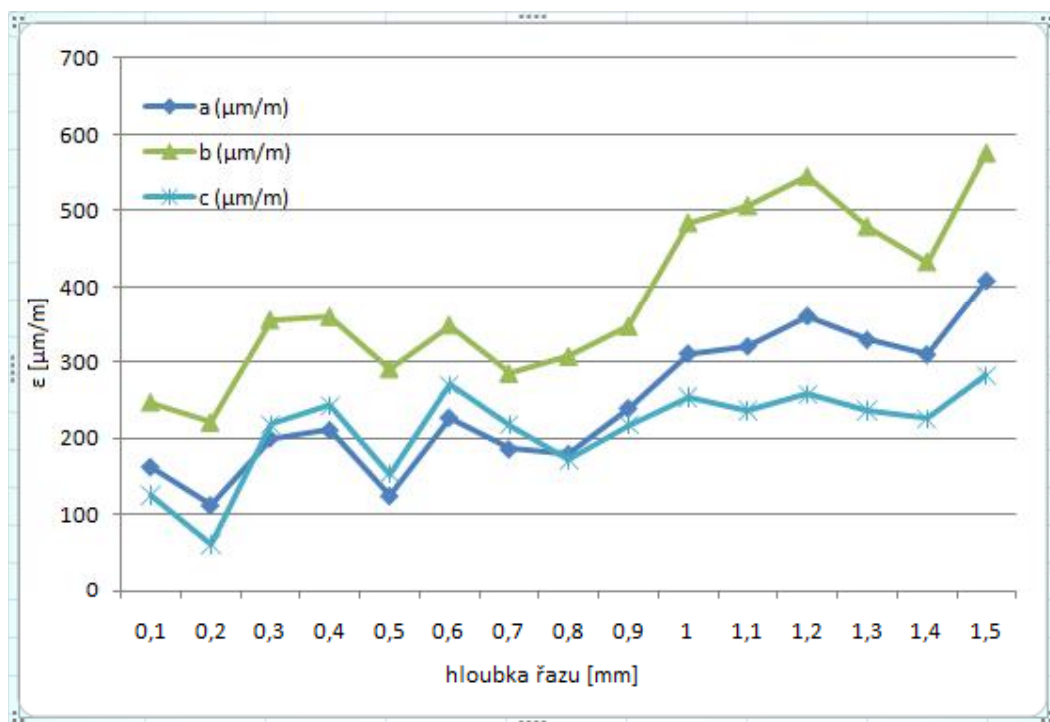
**Výsledné grafy:**

Projekt B – nelakovaný:



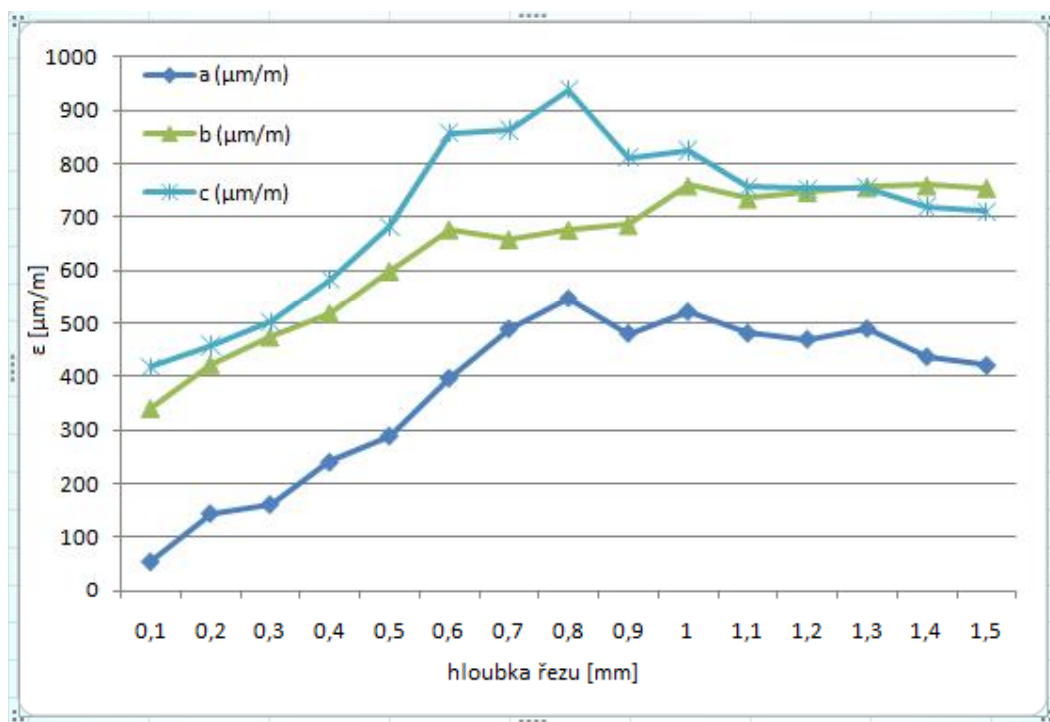
Obr. 6.10 Projekt B - nelakovaný

Projekt B – lakovaný:



Obr. 6.11 Projekt B - lakovaný

Projekt B – smontovaný:



Obr. 6.12 Projekt B - smontovaný

**Popis dosažených výsledků měření:**

Orientace tenzometrů **a** – 0° kolmo na okraj, **b** – 135° (45°) na tenzometr, **c** – 0° kolmo na okraj

Sklo nelakované – největší koncentrace poměrné deformace  $\varepsilon$  je v ose a, tedy kolmo na okraj skla, deformace v ostatních směrech je v závislosti na hloubce poměrně konstantní

Sklo lakované – největší koncentrace poměrné deformace  $\varepsilon$  je v ose b, zůstala ovšem na stejné úrovni jako před lakováním, rovněž jako v ose b. V ose a došlo k výraznému poklesu deformace na polovinu původní úrovně

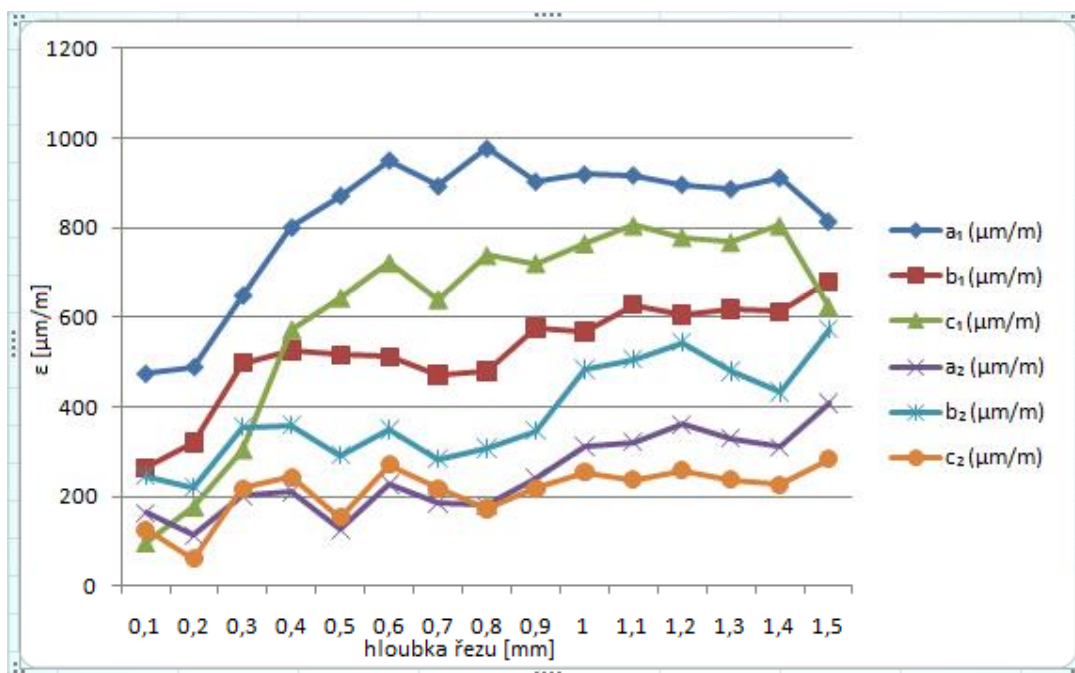
Sklo smontované – největší koncentrace poměrné deformace  $\varepsilon$  je v ose c a b, došlo zvláště v ose c k násobnému navýšení deformace skla, osa a zůstala na podobné úrovni jako po lakování

**Závěr projektu B:**

- I. Etapa výroba: Sklo po vylišování má největší deformace ve směru kolmém na okraj skla.
- II. Etapa lakování: Po tepelných úpravách spojených s procesem lakování, dojde k rovnoměrnému rozložení deformace, což lze přirovnat k procesu žíhání. Tento proces má na stav skla pozitivní důsledky.
- III. Etapa montáž: Po montáži do rámu světlometu dojde přerozdělení deformací a násobnému nárůstu deformace v ose c, která je rovnoběžná s osou světlometu a probíhající hranou. Deformace v tomto směru mohou být hlavní příčinou inicializace trhlin na okraji skla.



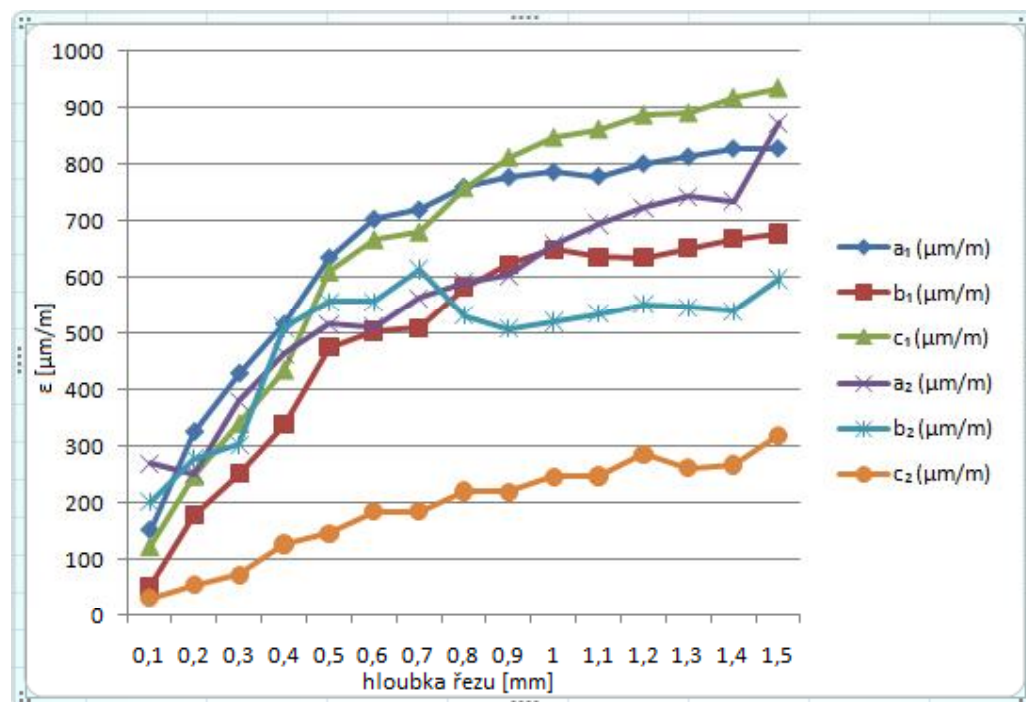
Obr. 6.13 Projekt B (zleva montovaný, lakovaný, nelakovaný)

**Zhodnocení výsledků:**

Obr. 6.14 Projekt A, B - lakovaný

V tomto grafu je srovnání lakovaných dílů projektu A i B. Je patrné, že u projektu A, který obsahuje data ( $a_1, b_1, c_1$ ) se projevilo výraznější pnutí, než u projektu B, který obsahuje data ( $a_2, b_2, c_2$ ). Ze získaných výsledků usuzujeme, že rozdíly v dosažených měřeních by mohly být způsobeny odlišným tvarem obou projektů. Pravděpodobně také nanesením laku a jeho vytemperováním dochází k úpravě vlastností materiálu.

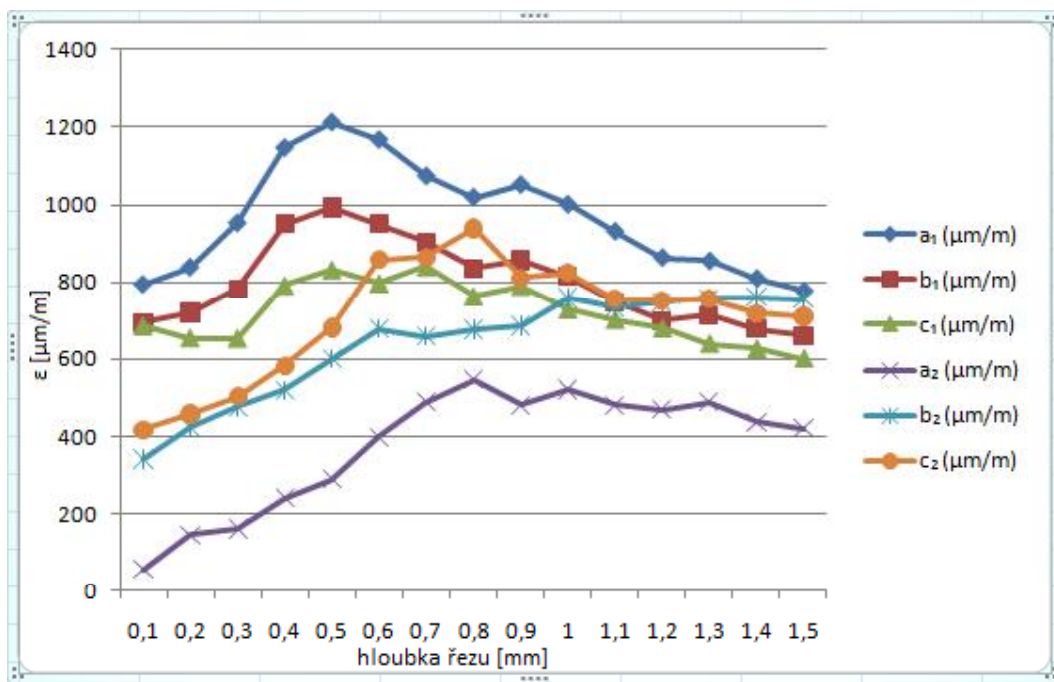




Obr. 6.15 Projekt A,B - nelakovaná

Na obrázku 6.13 jsou srovnané nelakované projekty A ( $a_1, b_1, c_1$ ) i B ( $a_2, b_2, c_2$ ). Opět se ukazuje, že u projektu A je vyšší pnutí než u projektu B.

Rozdílné napětí může být způsobeno parametry vstřikování či členitostí tvaru formy. I když to není příliš pravděpodobné, nicméně musíme připustit možnost nedodržení stanovené, počítačem řízené, teploty polykarbonátu (cca 280 °C) a formy, do níž se vstřikuje (cca 80 °C).



Obr. 6.16 Projekt A, B - smontovaný

U smontovaných projektů je větší napětí u objektu A, kde vlivem jeho působení vznikají deformace, které mohou být hlavní z příčin vzniku trhlin ve výrobku. Další z možných příčin vzniku napětí je způsob zkompletování skla v pouzdře, včetně postupu montáže.



## 6.2 Zdokumentování ostré hrany

Vzhledem k tomu, že u projektu B vznikají vady ve spodní části vlivem ostré hrany, byly udělány vzorky, které se následně vybrousily. Tento experiment byl prováděn z důvodu, že u tohoto projektu je ostrá hrana mnohem výraznější než u projektu A. Celé broušení bylo prováděno při 250 ot/min. Postup broušení byl takový, že se začínalo brusným papírem P400, pak P800, pak P1000 a nakonec P2500. Po broušení se vzorky vyleštily, každé leštění trvalo sedm minut. Na obrázku jsou 6.17 je vidět ostrá hrana nelakovaná, která je mnohem ostřejší než hrana na obrázku 6.18, která je lakovaná.



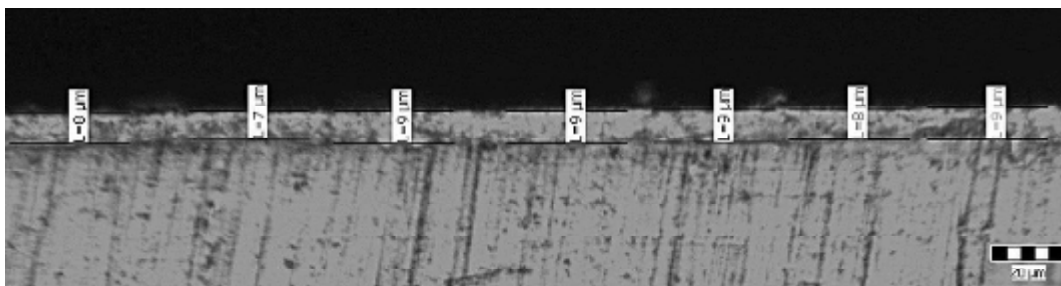
Obr. 6.17 Ostrá hrana nelakovaná



Obr. 6.18 Ostrá hrana lakovaná

Z obrázku je patrné, že ostrá hrana po vylisování je více výrazná, než hrana po lakování. V ostré hraně dochází k největšímu napětí a k pozdějším prasklinám. Na obrázku 6.17 je vidět studený spoj pod hranou, který může být způsoben, jak formou, tak i parametry lisování.

Na obrázku 6.19 je snímek tloušťky vrstvy laku. Bylo provedeno sedm měření, které ukázaly, že lak je rovnoměrně rozprostřen po celém povrchu, střední hodnota byla 8,4  $\mu\text{m}$ .



Obr. 6.19 Tloušťka vrstvy laku

### **Doporučení:**

Při tomto problému bych doporučila zaměřit na celý proces výroby od začátku. Vytvořením simulace napětí na skle, propočet pomocí metody konečných prvků. Tím by se našlo nejslabší místo, ve kterém by mohlo dojít k pozdějšímu vzniku vady. Na tomto místě se snažit pracovat a vytvořit v tom daném místě materiál o něco silnější než je doposud. Také se věnovat prostudování modelu a zjistit, kde vzniká nejsnáze prasklina. V druhé řadě se zaměřit na samotný proces vstřikování. Zkontrolovat parametry a čas vstřikování materiálu do formy, tak aby pod ostrou hranou nedocházelo k vytvoření studeného spoje. Věnovat se také tvaru formy. Zaměřit se na ostré hrany.

## **Závěr**

Důvodem této diplomové práce bylo studium zbytkových napětí v polykarbonátu, vzhledem k tomu, že o napětí v tomto materiálu jsou minimální informace, bylo velmi aktuální se touto problematikou zabývat.

V teoretické části jsem se zaměřila na popis vlastností polykarbonátu Lexan, který se vyznačuje vysokou mechanickou odolností, dobrými optickými a tepelnými vlastnostmi. Je to materiál, který je přizpůsoben pro tvářecí procesy vstřikování. Pro tuto práci bylo velmi důležité znát přesný proces výroby jednotlivých vzorků, a to od samotného vstřikování až po konečnou úpravu lakování. Tento postup jsem získala tím, že jsem navštěvovala firmu Hella Autotechnik s.r.o. a pro jeho realizaci, postupným sepisováním jsem získala celý postup.

V následující části jsem uvedla pět metod měření zbytkového napětí v polykarbonátu. Zde jsem se potýkala s nedostatkem literatury v českém jazyce a nedostatkem v tištěné podobě. Je to zřejmě způsobeno tím, že u nás zatím nedošlo k hlubšímu zkoumání zbytkového napětí v polykarbonátu. Jednou z výjimečností je zde metoda PRISM, která je založena na vyvrtání otvoru v měřeném materiálu a porovnáním pomocí laseru, stav otvoru před a po vrtání. Pomocí poskytnutých informací o vlastnostech materiálu, je software schopen vypočítat rovinné zbytkové napětí. Výhodou této metody je její rychlost.

V praktické části jsem na začátku popsala a zdokumentovala vady, které vznikají na projektech A, B. Na těchto dílech jsou největší problémy se vznikem vad. Pro měření zbytkového napětí byla zvolena odvrtávací metoda. Touto metodou se zabývá Ústav aplikované mechaniky v Brně, kde měření také proběhlo. Tato metoda je velice časově náročná, samotné vrtání náročné není, ale vyskytly se problémy s upevněním vzorků. Proto se použila na zpevnění nízkoexpanzní PUR pěnou, z důvodu zvýšení tuhosti skořepiny a vyloučení parazitních jevů samotném odvrtávání.

Výsledky, ke kterým jsme došli u projektu A – u vstřikování má sklo po operaci největší deformace ve všech směrech. U lakování a po tepelných úpravách spojených s procesem lakování, dojde k rovnoměrnému rozložení deformace, tento proces má na stav skla pozitivní důsledky. V montáži dojde k přerozdělení deformací a 20 – 40 % nárůstu napětí ve všech směrech, což může vést, dle parametrů materiálových a geometrických, k zpevnění konstrukce skla, ale zároveň ke snížení elasticity a větší náchylnosti na inicializaci trhliny.

U projektu B jsme došli k tomu, že ve výrobní etapě má sklo největší deformace ve směru kolmém na okraj skla. Při lakování a po tepelných úpravách spojených s procesem lakování, dojde k rovnoměrnému rozložení deformace. Opět tento proces vyšel jako pozitivní pro samotné sklo. Po montáži do rámu světlometu dojde k přerozdělení deformací a násobnému nárůstu deformace v ose c, která je rovnoběžná s osou světlometu. Deformace v tomto směru mohou být hlavní příčinou inicializace trhlin na okraji skla. Po srovnání obou projektů, skel lakovaných, nelakovaných a smontovaných, jsme došli k výsledku, že u dílů lakovaných, u projektu A se projevilo výraznější pnutí. Z výsledků lze usoudit, že rozdíly hodnot mohou být způsobeny tvarem projektů. U nelakovaných dílů může být rozdílné napětí způsobeno parametry vstřikování nebo členitostí formy. U smontovaných projektů je větší napětí u objektu A, kde vlivem jeho působení vznikají deformace, které mohou být hlavní z příčin vzniku trhlin ve výrobku. Další z možných příčin vzniku napětí je způsob zkompletování skla v pouzdře, včetně postupu montáže.

Výsledky poslouží firmě Hella Autotechnik s.r.o., se kterou jsem po celou dobu byla v kontaktu a konzultovala s nimi potřebné informace pro moji práci. Už nyní se zdá, že výsledky budou v praxi využity a pravděpodobná je možnost další spolupráce s Ústavem aplikované mechaniky v Brně.

## Použitá literatura

[1]

[http://www.hella.com/produktion/HellaPortal/WebSite/Internet\\_cz/Internet\\_HAT\\_cz/OFirme/OFirme.jsp](http://www.hella.com/produktion/HellaPortal/WebSite/Internet_cz/Internet_HAT_cz/OFirme/OFirme.jsp) [online]. 1994 [cit. 2011-02-28] Dostupné z www: < <http://www.hella.com> >.

[2] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Polykarbon%C3%A1t> [online]. Dostupné z www: <<http://cs.wikipedia.org>>.

[3] Strnadel, B.: *Nauka o materiálu*. Ostrava: VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2004, 187 s.

[4] Mohyla, M.: *Strojírenské materiály I*. Ostrava: VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2006, 146 s.

[5]

[http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/predmety/koroze\\_materialu\\_pro\\_restauratory/kadm/pdf/3\\_2.pdf](http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/predmety/koroze_materialu_pro_restauratory/kadm/pdf/3_2.pdf) [online]. [Cit. 2011-02-28] Dostupné z www: <<http://www.vscht.cz>>.

[6] [ozeas.sdb.cz/panska/2A/.../36%20%20Příprava%20polymerů.doc](http://ozeas.sdb.cz/panska/2A/.../36%20%20Příprava%20polymerů.doc) [online]. [Cit. 2011-03-01] Dostupné z www: <<http://www.google.cz/>>

[7] [www.geoplastics.com/resins/materials/lexan.html](http://www.geoplastics.com/resins/materials/lexan.html) [online]. [Cit. 2011-02-28] Dostupné z www: < [www.geoplastics.com](http://www.geoplastics.com) >.

[8] <http://www.moos.cz/upload/polykarbonat.pdf> [online]. [Cit. 2011-02-28] Dostupné z www: < <http://www.moos.cz> >.

[9] [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/04.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm) [online]. [Cit. 2011-02-28] Dostupné z www: < <http://www.ksp.tul.cz> >.

[10] Al-Saidi, L.F.: *Polymer Degradation and Stability* 82. Denmark: THE DANISH POLYMER CENTER, 2003, 461 s.

[11] Wang, W.-C.: *Optics and Lasers in Engineering* 38. Republika of China: NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY, 2001, 113 s.

[12] Hornberger, L.E.; DeVries, K.L.: *Measurement of Favorable Residual Stresses in Polycarbonate*. Salt Lake City: UNIVERSITY OF UTAH, 1987, 98 s.

[13] Wang, W.-C.: *Measurement* 42. Taiwan: CHUNG HUA UNIVERSITY, 2008, 558 s.

[14] [http://www.innogrind.nl/hd1000c\\_Prism.pdf](http://www.innogrind.nl/hd1000c_Prism.pdf) [online]. [cit. 2011-05-20] Dostupné z www: <<http://www.innogrind.nl>>

[15] Ochodek, Vl.: *Zbytkové napětí a distorze*. Materiály kurzu: Podpora technologických procesů svařování a tepelného zpracování pomocí numerických simulací. Mecas ESI s.r.o. PLZEŇ, 2008.

[16] [http://polar-peza.euweb.cz/vyuziti\\_polarizace.html#Fotoelasticimetrie](http://polar-peza.euweb.cz/vyuziti_polarizace.html#Fotoelasticimetrie) [online]. [Cit. 2011-05-20] Dostupné z www:< <http://polar-peza.euweb.cz>>

[17] Vlk, M.: *Experimentální mechanika*. Brno: VUT – VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ, 2003

[18] [http://artax.karlin.mff.cuni.cz/~sidlof/vyuka/LA1/Materialy%20k%20prednaskam%20\(cesky\)/tenzometryHBM\\_CZ.pdf](http://artax.karlin.mff.cuni.cz/~sidlof/vyuka/LA1/Materialy%20k%20prednaskam%20(cesky)/tenzometryHBM_CZ.pdf) [online]. [Cit. 2011-20-05] Dostupné z www: <<http://artax.karlin.mff.cuni.cz/>>

[19] <http://www.hbm.cz> [online]. [Cit. 2011-05-21] Dostupná z www: <<http://www.hbm.cz/>>

## Přílohy

### Příloha A

Minerální kyseliny		Alkoholy	
Kyselina boritá	+	Chlorethanol 2	-
Chlorovodík 20%	+	Etanol	-
Chlorovodík 25%	-	Ethylglykol 100%	-
Fluorovodík 25%	+	Ethylglykol 60%	+
Kyselina dusičná 70%	-	Glycerol	+
Kyselina fosforečná	-	Propylenglykol	-
Kyselina sírová 50%	+	Nonan	-
Kyselina sírová 70%	-	Oktan	+
Kyselina sírová 5%	-	Heptan	-
Organické kyseliny		Étery	
Kyselina chlorovodíková 20%	+	Propylenoxid	-
Kyselina chlorovodíková 25%	-	Ether	-
Kyselina olejová	+	Plyny	
Kyselina salicylová	+	Amoniak koncentrát	-
Tanin	+	Brom	-
Tanin 20%	-	Jód	-
Kyselina aminosulfonová	0	Metan	-
Zásady		Kyslík	+
Hydroxid sodný 10%	-	Ozón 2%	-
Hydroxid draselný 10%	-	Propylen	+
Hydroxid vápenatý	-	Fenoly	
Hydroxid amonný 0,13%	-	Fenol 5%	-
Amoniak koncentrát	-	Kovy a oxidy kovů	
Estery		Oxid draselný	-
Methyl	+	Vápník	-
Triacetin	-	Měď	+
Acetát celulózy	-	Kovové rtuť	-
Dioktyl	-	Anorganické soli	
Organické soli		Chlorid hlinitý	-

Octan amonný	-	Chlorid vápenatý	-
Octan sodný 30%	-	Chlorid hořečnatý	+
<b>Anorganické soli</b>		<b>Anorganické soli</b>	
Chlorid barnatý	+	Oxid zinečnatý	-
Oxid draselný	-	Draslík	+
Síran vápenatý	+	Jodid draselný	+
Sodík	+	Fluorid sodný	+



## Popis firmy

Firma zabývající se automobilových průmyslem v Mohelnici vznikla v roce 1992 jako dceřiná společnost Hella KGaA Hueck&Co. Strategické rozhodnutí bylo realizováno od roku 1992 až do roku 1994, kdy cílem bylo následovat firmu Volkswagen a založit zde závod na výrobu světelné techniky pro nové typy vozů.[1]

Začínalo se tady s výrobou zadních světlů, blinkrů a ostřikovačů světlometů pro vozy Škoda Felicia. Po úspěšném realizování tohoto projektu si Hella Autotechnik s.r.o. začala získávat další zakázky.[1]



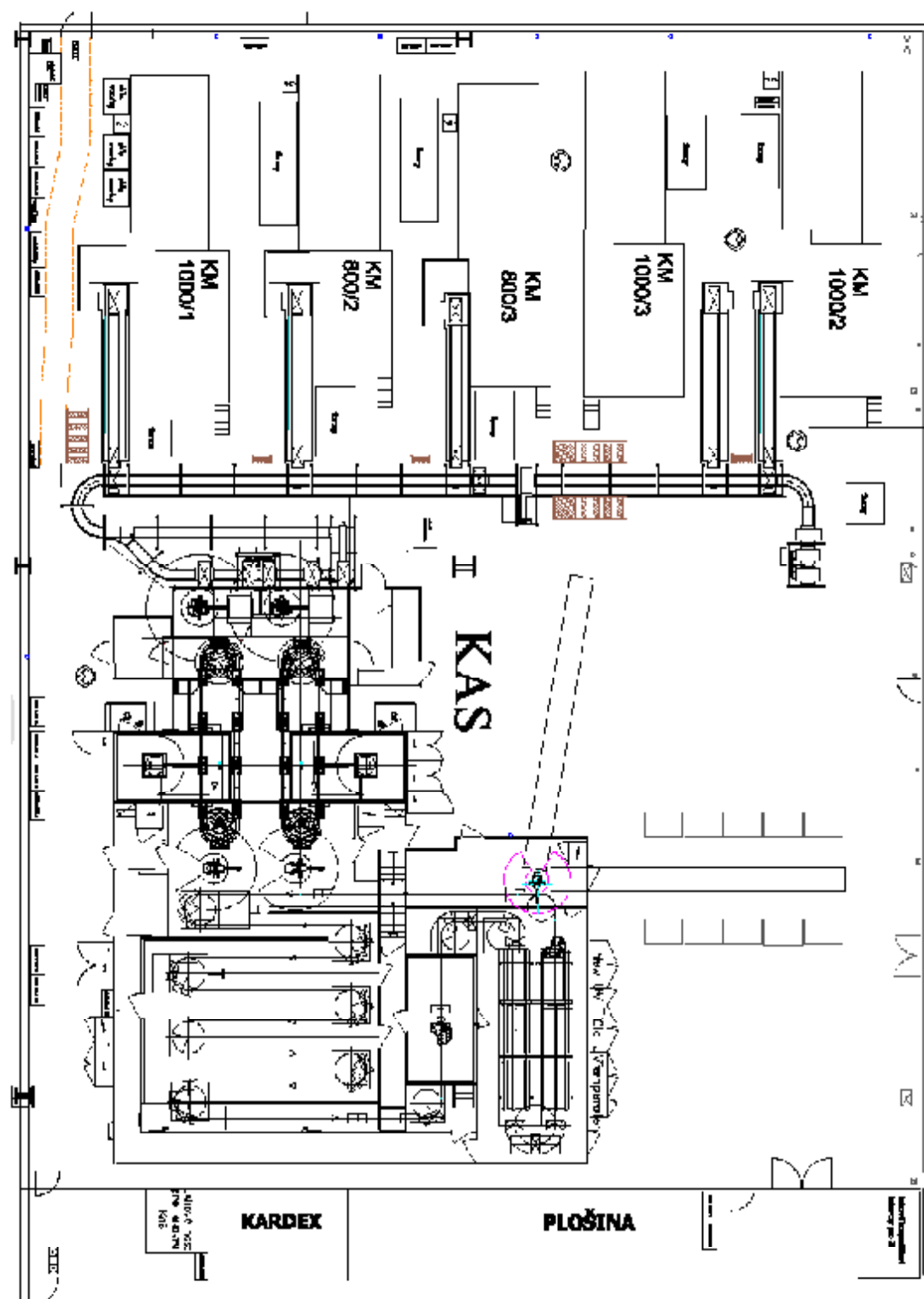
Obr. 1. 1. Hella Autotechnik s.r.o.

Světlomety vyrobené ve firmě v Mohelnici patří ke značkám, jako je Volkswagen, Ford, Jaguar, Audi, Renault, Nissan, Mitsubishi, Volvo, DAF a další jiné značky. Hlavní výrobní program firmy závisí na vývoji a výrobě světlometů.[1]

Vývoj obsahuje moderní navrhovací systém pro konstrukci výrobků. Používá se zde převážně software CATIA a AutoCad. Pro řešení specifických zadání z oblasti zkoušení a fyzikálních vlastností, firma spolupracuje s vysokými školami. Ve výrobě jsou činnosti rozděleny na předvýrobu, montáž a logistiku. V této oblasti je cílem společnosti poskytovat zákazníkovi co nejlepší služby.[1]

## Certifikáty





## Příloha D

## Technické údaje laku

1. Identifikace látky	
Obchodní název	UVHC3000
Použití	Povlak z plastické hmoty
2. Fyzikální a chemické vlastnosti	
Forma	Kapalina
Barva	Jantarový
Zápach	Jako akryl
Bod vzplanutí	32°C
Hustota	1,035 g/cm <sup>3</sup> při 20°C
3. Identifikace bezpečnosti	
Toxicita pro specifické cílové orgány	Kategorie 3
Senzibilizace kůže	Kategorie 1
Poleptání kůže	Kategorie 2
Vážné poškození očí	Kategorie 2
Hořlavé kapaliny	Kategorie 3
4. Skladování	
Nádoba musí být dobře uzavřeny a skladovány na suchém, chladném a dobře větratelném místě. Uchovávat v prostoru s podlahou odolávající rozpuštění.	
5. Osobní ochranné prostředky	
Ochrana dýchacích cest	Pokud jsou pracovníci vystaveni koncentracím nad mezní hodnoty
Ochrana rukou	Rukavice 0,35mm tlusté z nitrilového kaučuku
Ochrana očí	Ochranné brýle s bočními kryty
Ochrana kůže a těla	Pracovní oděv s dlouhými rukávy
Hygienická opatření	Zajistit dostatečné větrání, po zacházení umýt ruce
Ochranná opatření	Používejte pouze v dobře větraných prostorách
6. Pokyny pro odstraňování	
Výrobek	Podle místních předpisů může být předán do vhodné spalovny odpadů vybavené zařízením k čištění odpadních plynů
Znečištěné obaly	Zlikviduje se jako nepotřebný výrobek

**Bezpečnostní list ostříkovací kapaliny**

Název	Nemrznoucí směs do ostříkovačů
<b>1. Informace o složení látky</b>	
<b>Chemický název</b>	
etylalkohol ethylenglykol	
<b>2. Bezpečnost látky</b>	
<b>Nejzávažnější nepříznivé účinky na zdraví člověka při používání látky/přípravku :</b> Při inhalaci narkotické účinky, opilost, bolesti hlavy, žaludeční nevolnost, dráždění sliznic, očí a dýchacích cest. Kůže odmašťuje a poškozuje obdobně jako jiná rozpouštědla.	
<b>Nejzávažnější nepříznivé účinky na životní prostředí při používání látky/přípravku :</b> Ekologicky se odbourává.	
<b>Možné nesprávné použití látky/přípravku :</b> Hořlavá kapalina I. třídy, při úniku do volného prostoru se rychle odpařuje, páry jsou těžší než vzduch a mohou se terénem šířit daleko od místa úniku, se vzduchem tvoří výbušnou směs.	
<b>3. Pokyny pro zacházení a skladování</b>	
<b>Pokyny pro zacházení: používat</b> el. zařízení a další nářadí určené pro výbušné prostředí, zabránit vzniku statické elektřiny, používat pracovní oděv, ochranné rukavice,	
<b>Pokyny pro skladování: pro</b> přepravu, skladování a manipulaci platí ČSN 65 0201 a ČSN 65 6060, nejíst, nepít a nekouřit, chránit před nadýcháním, potřísněním kůže, el. instalace musí být provedeny pro výbušné prostředí, chránit před statickou elektřinou a otevřeným ohněm, zajistit účinné větrání.	
<b>4. Osobní ochranné prostředky</b>	
<b>Ochrana dýchacích orgánů:</b> při nedodržení NPK P použít pro krátkodobý pobyt ochrannou masku s filtrem proti organickým parám (A2-hnědý). Při vysoké koncentraci či dlouhodobém pobytu použít izolační dýchací přístroj (dálkový nebo přenosný kyslíkový)	
<b>Ochrana očí: těsné</b> ochranné brýle proti chemickým vlivům	
<b>Ochrana rukou: ochranné</b> rukavice	
<b>Ochrana kůže: ochranný</b> pracovní oděv	
<b>5. Fyzikální a chemické údaje</b>	
<b>Skupenství (při 20 C) :</b> čirá kapalina s možností opalescence <b>Barva:</b> světle zelená <b>Zápach (vůně) :</b> typický alkoholový, nebo dle použitého parfému <b>Hodnota pH (při °C) :</b> neuvádí se <b>Teplota (rozmezí teplot) tání:</b> -114°C <b>Teplota (rozmezí teplot) varu:</b> 78°C <b>Bod vzplanutí:</b> 14°C <b>Hořlavost:</b> 31°C <b>Samozápalnost:</b> 420°C	